

УДК 621.3.07

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА
В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Клюев О.В., ст. преп., Садовой А.В., д.т.н., проф.

Днепродзержинский государственный технический университет

51918, г. Днепродзержинск, ул. Днепростроевская, 2

E-mail: Kluev2006@ukr.net

Виконано аналіз стійкості стаціонарних процесів в асинхронному вентильному каскаді з векторним керуванням. Визначено границі виникнення автоколивань і запропонований спосіб їхнього усунення.

Ключові слова: реактивна потужність, стійкість, автоколивання, векторне керування.

The analysis stability of stationary processes in the asynchronous gate cascade with field-oriented control is performed. The boundaries of auto-oscillations appearance are defined and the mode of their removal is offered.

Key words: jet capacity, stability, auto-oscillations, vector control.

Введение. В работе [1] предложен алгоритм экстремального управления, обеспечивающий наибольшее количество реактивной энергии, вырабатываемой асинхронным вентильным каскадом (АВК) при заданных скорости и моменте нагрузки:

$$I_{ru}^* = \begin{cases} \varphi_{ru}^0, & \text{если } \varphi_{ru}^0 < I_{ru}''; \\ I_{ru}'' , & \text{если } \varphi_{ru}^0 \geq I_{ru}'' , \end{cases} \quad (1)$$

где φ_{ru}^0 – экстремальное значение реактивной составляющей тока ротора; I_{ru}'' – допустимая величина реактивного тока ротора; I_{ru}^* – величина задания тока регулятору.

Ток в роторной цепи в установившемся режиме не превышает номинальное значение, если допустимая величина его реактивной составляющей находится по формуле:

$$I_{ru}'' = \sqrt{I_{r\text{нн}}'^2 - I_{rv}^2} , \quad (2)$$

где $I_{r\text{нн}}'$ – амплитуда номинального фазного тока ротора приведенного к статору;

При синтезе системы векторного управления за ориентирующий принят вектор потокосцепления статора $\dot{\Psi}_s$. Координата \tilde{I}_{ru} определяется по формуле [1]:

$$\varphi_{ru}^0 = \frac{k_s \Psi_s \omega}{2L_\delta (\omega_0 - \omega)} , \quad (3)$$

и доставляет минимум суммарной реактивной мощности как целевой функции [1]:

$$Q_\Sigma = Q_s + Q_r = \frac{3\Psi_s^2 \omega_0}{2L_s} + \frac{2L_\delta M_c^2 (\omega_0 - \omega)}{3N^2 k_s^2 \Psi_s^2} - \frac{3}{2} k_s \Psi_s \omega I_{ru} + \frac{3}{2} L_\delta (\omega_0 - \omega) I_{ru}^2 . \quad (4)$$

При перевозбужденной машине в режиме генерации реактивной мощности в сеть могут появиться

устойчивые автоколебания модуля вектора потокосцепления статора Ψ_s . Если реактивная мощность статора имеет емкостной характер, а реактивная мощность ротора - индуктивный характер, то статор можно представить некоторым емкостным накопителем реактивной энергии, а ротор - индуктивным накопителем. Переток реактивной энергии между двумя накопителями может иметь вид устойчивых автоколебаний с компенсацией потерь энергией электрической сети. Образуется колебательный контур, состоящий из некоторых эквивалентных емкости и индуктивности. Возникает электромагнитная неустойчивость, называемая самовозбуждением [2], при котором режим работы АВК с отдачей в сеть максимальной реактивной мощности становится практически нереализуемым.

Цель работы. Основной целью данной работы является анализ статической устойчивости АВК с емкостными токами в статорной цепи.

Материал и результаты исследования. Для изучения контура, в котором развиваются устойчивые периодические процессы, необходимо записать его уравнения динамики. Полная система уравнений АВК в ортогональных осях, ориентированных по вектору потокосцепления статора $\dot{\Psi}_s$, имеет вид:

$$\begin{aligned} pI_{ru} &= \frac{k_s}{T_s L_\delta} \Psi_s - \frac{I_{ru}}{T_1} - \omega I_{rv} + k_s R_s \frac{I_{rv}^2}{\Psi_s} + \\ &+ \frac{I_{rv}}{\Psi_s} U_s \sin \delta - \frac{k_s}{L_\delta} U_s \cos \delta + \frac{U_{ru}}{L_\delta}; \\ pI_{rv} &= \frac{k_s}{L_\delta} \Psi_s \omega - \frac{I_{rv}}{T_1} + \omega I_{ru} - k_s R_s \frac{I_{rv} I_{ru}}{\Psi_s} - \\ &- \frac{I_{ru}}{\Psi_s} U_s \sin \delta - \frac{k_s}{L_\delta} U_s \sin \delta + \frac{U_{rv}}{L_\delta}; \\ p\delta &= \omega_0 - k_s R_s \frac{I_{rv}}{\Psi_s} - \frac{U_s \sin \delta}{\Psi_s}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$p\Psi_s = -\frac{\Psi_s}{T_s} + \frac{L_m}{T_s} I_{rv} + U_s \cos \delta ;$$

$$p\omega = -\frac{3N^2 k_s}{2J} \Psi_s I_{rv} - \frac{N}{J} M_c .$$

В канале реактивной мощности регулируется ток I_{rv} и его переходной процесс полностью определяется системой управления. Следовательно, первое уравнение системы (5) можно не рассматривать. В канале активной мощности работают два последовательно включенных регулятора активного тока ротора и скорости, которые задают динамику координат I_{rv} и ω . Поэтому не учитывается второе и пятое уравнения системы (5).

Таким образом, контур, в котором возникают колебания потока, описывается двумя оставшимися уравнениями, а именно:

$$p\delta = \omega_0 + \frac{2R_s M^*}{3N\Psi_s^2} - \frac{U_s \sin \delta}{\Psi_s} ;$$

$$p\Psi_s = -\frac{\Psi_s}{T_s} + \frac{L_m I_{rv}^*}{T_s} + U_s \cos \delta , \quad (6)$$

где активную составляющую тока ротора заменили соотношением:

$$I_{rv} = -\frac{2M^*}{3Nk_s \Psi_s} . \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) M^* – установившееся значение электромагнитного момента; I_{rv}^* – величина задания реактивного тока ротора; δ – угол между опорным вектором потокосцепления статора $\dot{\Psi}_s$ и вектором напряжения статора \dot{U}_s .

Значение I_{rv}^* соответствует току I_{rv} , который удерживается на заданном уровне системой управления. В режиме стабилизации скорости регулятор скорости изменяет активный ток ротора I_{rv} в противофазе к потоку Ψ_s для подавления колебаний электромагнитного момента, что обеспечивает его постоянство и выполнение условия $M^* = M_c$.

Локальная устойчивость установившегося процесса определяется собственными числами матрицы Якоби J , элементы которой вычисляются в точке стационарного режима.

При вычислениях учитывается, что параметры, в которые входит индуктивность L_m , зависят от величины модуля потока Ψ_s , а значение индуктивности находится по формуле:

$$L_m = a - b\Psi_s^2 , \quad (8)$$

где $a = 1.505L_{mn}$; $b = \frac{0.501L_{mn}}{\Psi_{sh}^2}$.

Соотношения для определения элементов матрицы Якоби приведены ниже:

$$c_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial \delta} = -\frac{U_s \cos \delta}{\Psi_s} ; \quad c_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial \delta} = -U_s \sin \delta ;$$

$$c_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial \Psi_s} = -\frac{4R_s M^*}{3N\Psi_s^3} + \frac{U_s \sin \delta}{\Psi_s^2} ; \quad (9)$$

$$c_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial \Psi_s} = -\frac{1}{T_s} \left(1 + \frac{2b\Psi_s^2}{L_s} + 2b(1-k_s)\Psi_s I_{rv}^* \right) .$$

Для определения числовых значений коэффициентов (9) необходимо найти точку установившегося режима работы $(\tilde{\delta}, \tilde{\Psi}_s)$ при заданных величинах M^* и I_{rv}^* в результате решения следующей системы уравнений:

$$\omega_0 + \frac{2R_s M^*}{3N\Psi_s^2} - \frac{U_s \sin \delta}{\Psi_s} = 0 ;$$

$$-\frac{\Psi_s}{T_s} + \frac{L_m I_{rv}^*}{T_s} + U_s \cos \delta = 0 , \quad (10)$$

учитывая, что $L_m = f(\Psi_s)$ и $T_s = f(\Psi_s)$.

При анализе устойчивости, используя известные значения M^* и I_{rv}^* , а также параметры асинхронной машины (АМ), можно решить численным методом нелинейную систему уравнений (10) и найти координаты статического режима $(\tilde{\delta}, \tilde{\Psi}_s)$.

Однако, если допустить, что $R_s = 0$, то $T_s \rightarrow \infty$ и $U_s \cos \delta = 0$. Тогда из системы (10) следует:

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} ; \quad \tilde{\Psi}_s = \frac{U_s}{\omega_0} . \quad (11)$$

Учет активного сопротивления статора незначительно отклоняет решения системы (10) от значений (11). Для построения зависимости $\tilde{\delta}(I_{rv})$ разложим косинус в ряд Тейлора:

$$\cos(\delta_0 + \Delta\delta) = \cos \delta_0 - \sin \delta_0 (\delta - \delta_0) - \frac{\cos \delta_0}{2} (\delta - \delta_0)^2 + \dots . \quad (12)$$

Если принять $\delta_0 = \frac{\pi}{2}$, то в соответствии с (12) можно записать:

$$\cos \vartheta = \cos \left(\frac{\pi}{2} + \Delta\delta \right) \approx -\left(\vartheta - \frac{\pi}{2} \right) .$$

Далее подставим полученное соотношение во второе уравнение системы (10) и после преобразований придем к линейной зависимости угла между векторами $\dot{\Psi}_s$ и \dot{U}_s в статике от реактивного тока ротора :

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} - \frac{\Psi_s^*}{T_s U_s} + \frac{L_m I_{rv}^*}{T_s U_s} . \quad (13)$$

Расчеты по выражению (13) показывают, что при изменении I_{rv}^* в диапазоне $-I_{rnh}^* \div I_{rnh}^*$ угол $\tilde{\delta}$ меняется в пределах $(0.98 \div 1.02) \frac{\pi}{2}$.

При малых изменениях угла $\tilde{\delta}$ в окрестности значения $\pi/2$ для приближенных расчетов можно принять $\sin \tilde{\delta} \approx 1$. Тогда $\tilde{\Psi}_s$ для установившегося режима будет определяться по формуле:

$$\Psi_s^* = \frac{3NU_s + \sqrt{9N^2U_s^2 - 24NR_s\omega_0 M^*}}{6N\omega_0}, \quad (14)$$

вытекающей из первого уравнения системы (10).

При $M^* = 0$ соотношение (14) вырождается в формулу (11), которой и целесообразно пользоваться вследствие незначительной зависимости $\tilde{\Psi}_s$ от момента нагрузки M^* .

Из проведенного анализа системы (10) следует, что координаты точки установившегося режима $(\tilde{\delta}, \tilde{\Psi}_s)$ практически не зависят друг от друга и при изменении одной из них вторая остается постоянной.

Второе уравнение системы (10) можно записать так:

$$\cos \varphi = \frac{\Psi_s^*}{T_s U_s} - \frac{L_m}{T_s U_s} I_{ru}^*. \quad (15)$$

Характеристическое уравнение матрицы Якоби имеет вид:

$$\det(J - \lambda E) = \lambda^2 + (-c_{11} - c_{22})\lambda + (c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}) = 0. \quad (16)$$

Тогда можно получить приближенную зависимость $\text{Re } \lambda(I_{ru}^*)$ в следующем виде:

$$\text{Re } \lambda = \frac{c_{11} + c_{22}}{2} = -\frac{U_s \cos \varphi}{2\Psi_s^*} - \frac{1}{T_s} \left(\frac{1}{2} + \frac{b\Psi_s^2}{L_s} + b(1-k_s)\Psi_s I_{ru}^* \right). \quad (17)$$

Подставив в (17) вместо $\cos \tilde{\delta}$ его выражение (15), после преобразований получим:

$$\text{Re } \lambda = -\left(\frac{1}{T_s} + \frac{b\Psi_s^2}{T_s L_s} \right) + \left(\frac{L_m}{2T_s \Psi_s^*} - \frac{b(1-k_s)\Psi_s}{T_s} \right) I_{ru}^* = g_0 + g_1 I_{ru}^*. \quad (18)$$

Ток I_{ru}^* , при котором $\text{Re } \lambda = 0$, находится по соотношению:

$$I_{ru}^* = \frac{2\Psi_s^* (L_s + b\Psi_s^2)}{L_s L_m - 2bL_{s\sigma}\Psi_s^2}. \quad (19)$$

Расчеты, сделанные по формуле (19) для АМ серии 4А, приводят к следующим данным:

$$i_{ru} = \frac{I_{ru}^*}{I_{r\text{нн}}} = 0.5 - 0.8, \text{ что согласуется с результатами математического моделирования. По мере роста мощности АМ величина данного соотношения уменьшается.}$$

При больших значениях реактивного тока ротора $\text{Re } \lambda > 0$ и точка стационарного режима $(\tilde{\delta}, \tilde{\Psi}_s)$ перестает быть асимптотически устойчивой. Корни характеристического уравнения (16) представляют пару комплексно-сопряженных чисел и в линейной системе колебания нарастают бы беспрестанно. В реальной системе амплитуды колебаний ограничиваются нелинейностями, в том числе и нелинейно-

стями, отражающими конечную мощность источников питания. Поэтому в нелинейных системах за областью асимптотической устойчивости, как правило, наступают устойчивые автоколебания. В исследуемом здесь явлении амплитуда колебаний потокоцепления ограничивается, главным образом, насыщением магнитопровода АМ.

Известно, что наиболее точно процесс изменения рабочего потока АМ описывает ток намагничивания $\dot{I}_\mu = \dot{I}_s + \dot{I}_r$. В силу соотношения $\dot{\Psi}_0 = L_m \dot{I}_\mu$ формы переходных процессов тока \dot{I}_μ и потокоцепления воздушного зазора $\dot{\Psi}_0$ одинаковые в осях координат, ориентированных по вектору $\dot{\Psi}_0$. Поскольку $\dot{\Psi}_s$ отличается от $\dot{\Psi}_0$ на величину потока рассеяния $\dot{\Psi}_s = \dot{\Psi}_0 + \dot{\Psi}_{s\sigma}$, то инерционность потока статора по отношению к току намагничивания \dot{I}_μ определяется малой постоянной времени $T_{s\sigma} = L_{s\sigma}/R_s$, обусловленной потоками рассеяния статора.

Поэтому в статье предлагается с целью предотвращения автоколебаний в канале реактивной мощности осуществлять регулирование реактивной составляющей тока намагничивания, величина задания которой будет определяться по соотношению:

$$I_{\mu\mu}^* = (1-k_s)I_{ru}^* + \frac{\Psi_s^*}{L_s}, \quad (20)$$

при токе I_{ru}^* , найденном по алгоритму (1), и значении $\tilde{\Psi}_s$, рассчитанному по формуле (11).

После замены тока I_{ru} в системе (5) через соотношение (20) на реактивную составляющую тока намагничивания $I_{\mu\mu}$, получим новую структуру уравнений динамики АВК, записанных в нормальной форме:

$$\begin{aligned} pI_{\mu\mu} &= \frac{1-k_s}{T_{\mu 1}L_\delta} \Psi_s - \frac{I_{\mu\mu}}{T_\mu} - (1-k_s)\omega I_{rv} + \\ &+ k_s R_s (1-k_s) \frac{I_{rv}^2}{\Psi_s} + (1-k_s) \frac{I_{rv}}{\Psi_s} U_s \sin \delta + \\ &+ \frac{(1-k_s)k_\sigma}{L_\delta} U_s \cos \delta + \frac{1-k_s}{L_\delta} U_{ru}; \\ pI_{rv} &= -\frac{k_\sigma}{L_\delta} \Psi_s \omega - \frac{I_{rv}}{T_\mu} + \frac{\omega I_{\mu\mu}}{1-k_s} - \frac{k_s R_s}{1-k_s} \frac{I_{rv} I_{\mu\mu}}{\Psi_s} - \\ &- \left(\frac{I_{\mu\mu}}{(1-k_s)\Psi_s} - \frac{k_\sigma}{L_\delta} \right) U_s \sin \delta + \frac{U_{rv}}{L_\delta}; \\ p\delta &= \omega_0 - k_s R_s \frac{I_{rv}}{\Psi_s} - \frac{U_s \sin \delta}{\Psi_s}; \\ p\Psi_s &= -\frac{\Psi_s}{T_s(1-k_s)} + \frac{L_m}{T_s(1-k_s)} I_{\mu\mu} + U_s \cos \delta; \\ p\omega &= -\frac{3N^2 k_s}{2J} \Psi_s I_{rv} - \frac{N}{J} M_c, \end{aligned} \quad (21)$$

где $k_{\sigma} = \frac{L_{r\sigma}}{L_{s\sigma}}$; $R_{\mu} = R_r - k_s k_{\sigma} R_s$; $T_{\mu} = \frac{L_{\delta}}{R_{\mu}}$;

$$T_{\mu 1} = \frac{L_{s\sigma}}{R_r - k_{\sigma} R_s}, T_{s\sigma} = T_s (1 - k_s) = \frac{L_{s\sigma}}{R_s}.$$

Исследование устойчивости вектора потокосцепления Ψ_s проводится аналогично вышеизложенному. Уравнения для δ и Ψ_s системы (21) после преобразований записываются в следующем виде:

$$p\delta = \omega_0 + \frac{2R_s M^*}{3N\Psi_s^2} - \frac{U_s \sin \delta}{\Psi_s}; \quad (22)$$

$$p\Psi_s = -\frac{\Psi_s}{T_s(1-k_s)} + \frac{L_m}{T_s(1-k_s)} I_{\mu u}^* + U_s \cos \delta.$$

Первое уравнение в (22) такое же, как в (6). Второе уравнение имеет постоянную времени в $1/(1-k_s)$ раз меньшую, чем соответствующее уравнение системы (6).

Соотношения для определения элементов матрицы Якоби системы (22) совпадают с выражениями (9) за исключением коэффициента $c_{22} = \partial f_2 / \partial \Psi_s$, оказывающего определяющее влияние на устойчивость и равного:

$$c_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial \Psi_s} = -\frac{1}{T_s(1-k_s)} (1 + 2b\Psi_s I_{\mu u}^*). \quad (23)$$

Координаты точки стационарного режима работы (δ^*, Ψ_s^*) находят как решение системы уравнений, получающейся из (22) при обращении производных в нуль. Анализ решений (δ^*, Ψ_s^*) позволил сделать вывод, что поток $\tilde{\Psi}_s'$ практически не зависит от значения угла δ^* , как и для системы (10). Поэтому для составления зависимости $\text{Re} \lambda(I_{ru}^*)$ можно применить тот же подход, что использовался выше.

Из второго уравнения системы (22) в статике имеем:

$$U_m \cos \delta^* = \frac{\Psi_s^*}{T_s(1-k_s)} - \frac{L_m}{T_s(1-k_s)} I_{\mu u}^*. \quad (24)$$

Приближенная зависимость $\text{Re} \lambda(I_{ru}^*)$ с учетом (24) запишется так:

$$\text{Re} \lambda = \frac{c_{11} + c_{22}}{2} = -\frac{1}{T_s(1-k_s)} + \left(\frac{L_m}{2T_s(1-k_s)\Psi_s^*} - \frac{b\Psi_s^*}{T_s(1-k_s)} \right) I_{\mu u}^*. \quad (25)$$

Если вместо $I_{\mu u}^*$ в (25) подставить соотношение (20), то после упрощающих преобразований получим:

$$\text{Re} \lambda = -\left(\frac{1}{2T_s} + \frac{L_s + 2b\Psi_s'^2}{2L_s T_s (1-k_s)} \right) + \left(\frac{L_m}{2T_s\Psi_s^*} - \frac{b\Psi_s^*}{T_s} \right) I_{ru}^* = g_2 + g_3 I_{ru}^*. \quad (26)$$

Анализ зависимости коэффициента g_3 от Ψ_s

показал, что при $\Psi_s < \sqrt{\frac{a}{3b}} = 0.973$ прямая (26)

будет возрастающей, а при обратном условии - убывающей.

С целью оценки степени близости прямой (26) к оси, по которой откладываются значения тока I_{ru}^* , для ряда АМ с фазным ротором серии 4А вычислено следующее отношение:

$$\frac{g_2}{g_0} = \frac{L_{s\sigma} + L_s + 2b\Psi_s'^2}{2(1-k_s)(L_s + b\Psi_s'^2)} = 18 \div 34 \gg 1. \quad (27)$$

Из выражения (27) и условия $g_1 > g_3$ следует, что график линейной зависимости (26) лежит значительно ниже и приближается к границе устойчивости медленнее, чем прямая (18). Поэтому действительные части корней характеристического уравнения матрицы J , оставаясь отрицательными, по модулю значительно больше, чем таковые для системы (6). Следовательно, при управлении реактивной составляющей тока намагничивания $I_{\mu u}$, АВК обладает значительно большим запасом устойчивости по сравнению с вариантом регулирования тока I_{ru} .

Регулирование реактивной составляющей намагничивающего тока $I_{\mu u} = I_{su} + I_{ru}$ в системе управления, ориентированной по вектору потокосцепления статора, приводит к тому, что инерционность процесса намагничивания с параметром L_m оказывается внутри контура регулирования тока $I_{\mu u}$ и компенсируется его регулятором. Постоянная времени возбуждения статора существенно уменьшается и создается только потоком рассеяния статора: $T_s(1-k_s) = L_{s\sigma}/R_s = T_{s\sigma}$. Таким образом, уменьшается величина реактивной мощности, на которую нельзя повлиять системой управления, что увеличивает запас устойчивости АВК и препятствует самовозбуждению.

Методом математического моделирования исследовались динамические режимы работы АВК, выполненного на базе асинхронной машины типа 4АНК315М4У3 со следующими техническими данными: $P_n = 250$ кВт, $U_{\phi} = 220$ В, $n_n = 1500$ об/мин. Модель асинхронной машины составлена в фазных осях с учетом влияния нелинейности кривой намагничивания на числовые значения параметров.

В канале активной мощности в состав системы управления АВК входят последовательно включенные регуляторы скорости и моментобразующей составляющей тока ротора с алгоритмами управления:

$$U_1 = -I_{rv}^* \text{sign}(\omega_r^* - \omega - \gamma p \omega);$$

$$U_2 = U_m \text{sign}(U_1 - I_{rv}). \quad (28)$$

Реактивная мощность роторной цепи регулируется одним из алгоритмов:

$$U_3 = U_m \text{sign}(I_{ru}^* - I_{ru}), \quad (29)$$

или

$$U_4 = U_m \text{sign}(I_{\mu u}^* - I_{\mu u}), \quad (30)$$

где сигналы задания I_{ru}^* и $I_{\mu u}^*$ определяются по соотношениям (1) или (20) соответственно.

Графики переходных процессов в АВК при использовании алгоритмов управления (29) или (30) и одинаковой структуре канала активной мощности с регуляторами (28) показаны на рисунке 1. Все величины на графиках показаны в относительных еди-

ницах: $\alpha = \omega/\omega_0$; $\mu = M/M_H$; $\psi_s = \Psi_s/\Psi_{SH}$; $i_{ru} = I_{ru}/I'_{gmH}$; $i_{rv} = I_{rv}/I'_{gmH}$; $i_{\mu u} = I_{\mu u}/I'_{gmH}$; $i_{su} = I_{su}/I_{smH}$; $q_r = Q_r/S_H$; $q_s = Q_s/S_H$; $q_\Sigma = Q_\Sigma/S_H$, где I_{smH} – амплитуда номинального фазного тока статора; S_H – полная номинальная мощность АМ.

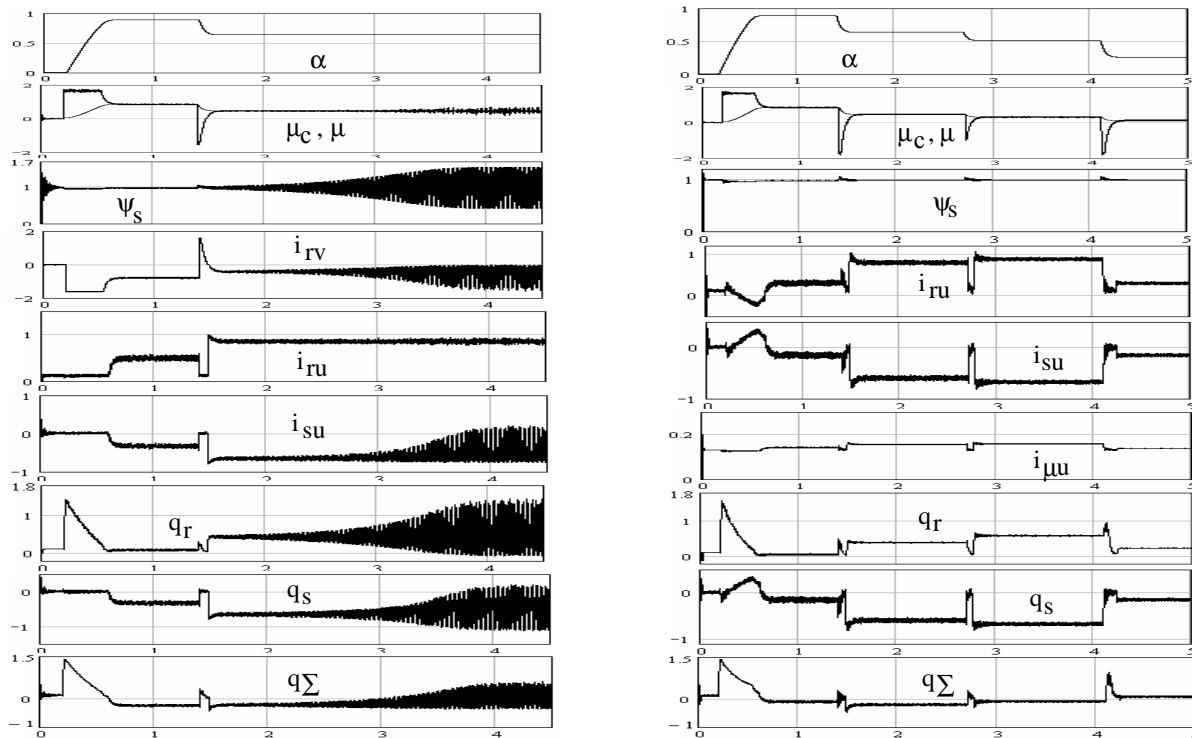


Рисунок 1 – Переходные процессы в системе регулирования реактивной мощности скорости АВК: а) – реализация алгоритмов управления (28) (29); б) – реализация алгоритмов управления (28) и (30)

Из рисунка видно, что от значения реактивного тока ротора зависит величина и характер реактивной мощности статорной цепи АВК. Однако при стабилизации непосредственно тока I_{ru} при больших его значениях и регулировании скорости в диапазоне ниже номинальной, в системе развиваются автоколебательные процессы (рис.1, а). Если же стабилизировать реактивную составляющую намагничивающего тока на уровне $I_{\mu u}^*$, соответствующем I_{ru}^* и определяемом по формуле (20), то процесса самовозбуждения не будет. При этом достигается удовлетворительное качество изменения координат АВК во всем интервале регулирования скорости от нулевого до номинальных значений (рис. 1, б).

Система управления построена таким образом, что в переходных процессах при повышенных значениях активной составляющей тока ротора его реактивная составляющая уменьшается до малой величины Ψ_s/L_m , при которой реактивная мощность статорной цепи равна нулю.

Выводы. Анализ устойчивости АВК в режиме генерации реактивной мощности в сеть показал, что

при реактивных токах ротора порядка половины номинального тока и выше возникают автоколебания опорного вектора потокоосцепления статора. Построение контура регулирования реактивной составляющей намагничивающего тока $I_{\mu u}$ со стабилизацией его по каналу реактивной мощности на уровне, соответствующем задающему сигналу I_{ru}^* , приводит к значительному увеличению степени статической устойчивости АВК и устранению колебательных процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Клюев О.В., Садовой А.В. Асинхронный вентильный каскад как объект экстремального управления. Национальный горный университет: Материалы международной конференции - Форум горняков. - Днепропетровск, 2005. - том 2, С. 212 - 225.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1970. - 472с.

Статья надійшла 10.04.2007 р.