

УДК 69

DOI 10.21661/r-557021

Ротанов В.Н., Шаров В.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Аннотация: в работе рассмотрены вопросы статической устойчивости асинхронных тяговых двигателей, получающих питания от автономных инверторов напряжения, при малых частотах тока статора. Определено влияние на пульсации электромагнитного момента двигателя изменения величины относительной частоты тока статора и пусковой частоты на среднее значение вращающего момента.

Ключевые слова: электроподвижной состав, асинхронные тяговые двигатели, электромагнитный момент.

Питание асинхронных тяговых двигателей (АТД) на электроподвижном составе осуществляется от статических преобразователей, выполненных на базе автономных инверторов напряжения (АИН) или инверторов тока.

На рисунке 1, а приведена одна из возможных схем преобразователя в виде АИН с общим устройством коммутации главных тиристоров и амплитудной модуляцией напряжения. Через обратный мост на диодах осуществляется обмен реактивной энергией между фазами двигателя и источником питания (или конденсатором фильтра C_{ϕ} на входе АИН).

Напряжения на фазах АТД (рисунок 1, б) можно определить по диаграмме проводящего состояния главных тиристоров $VS1 - VS6$ (рисунок 1, в) и выразить как

$$U_A = U_u f_a, U_B = U_u f_b, U_C = U_u f_c,$$

где U_u – мгновенные значения напряжения на входе инвертора.

f_a, f_b, f_c - коммутационные функции фазных напряжений.

Коммутационные функции фазных напряжение определяется программой включения силовых тиристоров инвертора и схемой соединения обмоток АТД.

Определив выражения для коммутационных функций и, следовательно, для результирующего вектора напряжения, можно решить уравнения асинхронной машины

$$u_1 = \frac{R_1}{L_{1\sigma}} \psi_1 + \frac{d\psi_1}{dt} - \frac{R_1 k_2}{L_{2\sigma}} \psi_2$$

$$u_2 = -\frac{R_2 k_1}{L_{2\sigma}} \psi_1 + \left(\frac{R_2}{L_{2\sigma}} - j\omega_2 \right) \psi_2 + \frac{d\psi_2}{dt}$$

$$M = \frac{3}{2} \frac{k_1}{L_{2\sigma}} \psi_2 \times \psi_1$$

где $k_2 = \frac{L\mu}{L_2}$ – коэффициент связи ротора;

$k_1 = \frac{L\mu}{L_1}$ – коэффициент связи статора.

Начальные условия $\psi_1(0)$ и $\psi_2(0)$ для установившегося режима находят из граничных условий межкоммутационных интервалов.

Поскольку в установившемся режиме электромагнитные процессы имеют периодический характер, то модули результирующих векторов потокосцеплений в начале и конце меж коммутационного интервала равны, а их аргументы отличаются на угол $\pi/3$

$$\psi_1(\pi/3) = \psi_1(0) \cdot \exp\left(\frac{\pi}{3}\right); \psi_2(\pi/3) = \psi_2(0) \cdot \exp\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

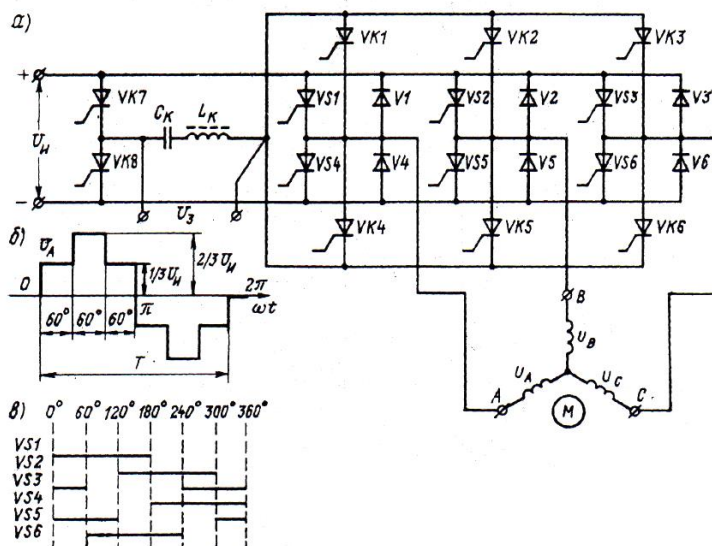


Рис. 1. Схема АИН (а), изменение фазного напряжения (б)
и диаграмма проводящего состояния тиристоров (в)

VS1 – VS6 – главные тиристоры; VK1 – VK6 – индивидуальные коммутирующие тиристоры; VK7, VK8 – групповые коммутирующие тиристоры; V1 – V6 – диоды обратного моста; L_k , C_k – коммутирующие реактор и конденсатор; М – АД

Необходимо иметь в виду, что при исследовании установившихся процессов и статической устойчивости достаточно рассмотреть интервал времени $0 < t < T$. Поскольку процессы будут иметь периодический характер, то решение, полученное при $0 < t < T/6$, может рассматриваться как общее решение для любого момента времени, т. е.

$$\psi_1\left(t + \frac{T}{6}n\right) = \psi_1(t)e^{j\frac{\pi}{3}n}$$

Оценивая влияние несинусоидальной формы питающего напряжения на характеристики АД, необходимо отметить, что электромагнитный момент двигателя является пульсирующим.

Частота пульсаций равна шестикратной частоте выходного напряжения преобразователя. Относительное значение пульсаций моментов

$$\delta_M = \frac{M_{max} - M_{min}}{2 \cdot M_{cp}},$$

где $M_{cp} = \frac{6}{T} \int_0^{\frac{T}{6}} M(t) dt$ – среднее значение момента.

Зависимости, приведенные на рисунке 2, соответствуют относительной частоте тока статора $f_1^* = \frac{f_1}{f_{1н}}$. Результаты расчетов, проведенные для различных f_1^* показывают, что при $f_1^* > 0.05$. и $f_2^* \geq 0.02$ ($f_2^* = \frac{f_2}{f_{1н}}$ – относительная частота тока ротора) относительное значение пульсаций момента не превышает 20%. Учитывая большую инерционную постоянную тягового привода, можно пренебречь влиянием пульсирующей составляющей момента на частоту вращения двигателя.

С учетом эксплуатации электроподвижного состава при исследовании статической устойчивости особый интерес представляют анализ электромагнитных процессов в АД при малых частотах и определение характеристик двигателя при пуске. В условиях эксплуатации в момент трогания от локомотива требуется реализация значительных усилий. Асинхронный тяговый двигатель допускает кратковременно 3–6 кратные перегрузки по току. Однако таких перегрузок не допускает статический преобразователь, рассчитанный на номинальную мощность двигателя. Поэтому выбор начальной частоты должен проводиться из условия получения заданного момента на валу двигателя при максимальном токе инвертора или из условия получения максимального момента при заданном токе.

Для определения пусковой частоты, оценки влияния несинусоидальной формы выходного напряжения преобразователя на пусковой момент двигателя и статическую устойчивость двигателя рассмотрим электромагнитные процессы в двигателе при неподвижном роторе. При этом необходимо иметь в виду, что поскольку относительная частота вращения ротора двигателя $f_1^* - f_2^* = 0$, то характеристическое уравнение имеет только действительные корни, соответствующие коэффициентам затухания свободных составляющих.

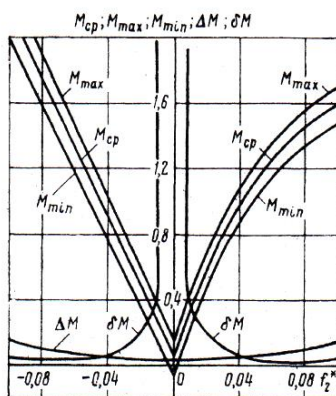


Рис. 2. Зависимости от f_2^* относительного значения пульсации момента δM абсолютной величины ΔM , значений M_{max} и M_{min} , а также среднего момента M_{cp} при $f_1=1$

Кривые тока АД (рисунок 3, а) получены для относительных частот $f_{10}^* = 0.02, 0.01, 0.05$.

Из временных диаграмм момента АД, показанных для этих же значений f_{10}^* , на рисунке 3, а, видно, что при значительном уменьшении f_{10}^* , происходит увеличение пульсаций момента и нарушается статическая устойчивость. При очень малых частотах момент к концу каждого периода переключения падает даже до нуля. При более высоких частотах, например при $f_{10}^* = 0.05$, пульсации момента практически отсутствуют.

Для оценки влияния пусковой частоты на среднее значение вращающего момента и статическую устойчивость можно провести расчет зависимости $M_{cp}(f_{10}^*)$ при условии постоянства среднего тока инвертора. Результаты расчета приведены на рисунке 4. Из него следует, что пусковой момент достигает значения M_{max} при $f_{10\ max} = 0,0113$. Физически данное явление можно объяснить следующим образом. Если частота $f_{10}^* < f_{10\ max}^*$ вращающий момент значительно уменьшается к концу каждого периода переключения, что снижает его среднее значение.

Значение $f_{10\ max}^*$ может быть определено через параметры АД. Для этого рассмотрим выражение для электромагнитного момента двигателя

$$M = m_1 I_1^2 \frac{x_\mu^2}{\left(R_2/f_2^*\right)^2 + x_2^2} \cdot \frac{R_2}{f_2^*}$$

где m_1 - число фаз двигателя;

I_1 – действующее значение тока статора.

Из этого выражения определяем, что момент асинхронного двигателя достигает максимального значения при $f_2^* = \pm \frac{R_2}{x_2} = f_{10\ max}^*$. Таким образом, если пусковая частота выбирается из условия $f_{10}^* = \frac{R_2}{x_2}$, то момент асинхронного двигателя будет максимальным при заданном токе. При этом сохранится статическая устойчивость машины.

Анализ кривых тока двигателя (рисунок 3, а) показывает, что по форме они приближаются к кривой напряжения (рисунок 1, б). Это говорит о высоком зна-

чении коэффициента мощности при пуске двигателя, что подтверждается расчетами. При изменении относительной частоты f_1^* в диапазоне от 0,001 до 0,05 коэффициент мощности $k_u > 0,925$.

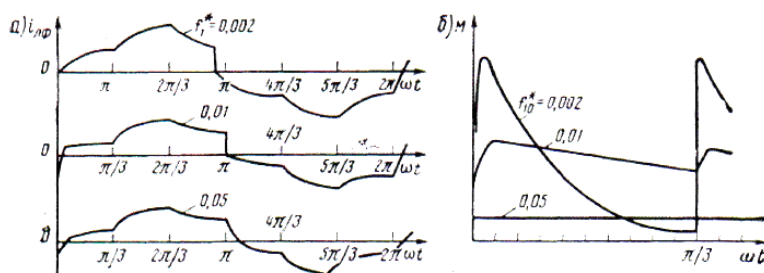


Рис. 3. Временные диаграммы пусковых токов (а) и момента асинхронного двигателя (б)

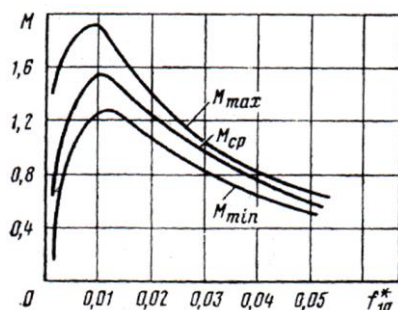


Рис. 4. Зависимости среднего, максимального и минимального моментов от частоты f_{10}

Выводы

1. С учетом эксплуатации электроподвижного состава и исследовании статической устойчивости целесообразно провести анализ электромагнитных процессов в асинхронных тяговых двигателях при малых частотах тока статора.

2. Выбор начальной частоты должен производиться из условия получения заданного момента на валу двигателя при максимальном токе инвертора или из условия получения максимального момента при заданном токе.

3. Из временных диаграммах момента асинхронного тягового двигателя видно, что при значительном уменьшении относительной частоты происходит увеличение пульсаций момента и нарушается статическая устойчивость. При очень малых частотах момент к концу каждого периода переключения падает даже до нуля.

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2010 – 350 с.
 2. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко / под ред. Ротанова Н.А. – М.: Транспорт. 1991 – 330.с.
-

Ротанов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия.

Шаров Вячеслав Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия.
