

Н.И. Горбачевский, И.Ф. Афлятунов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫМИ В ЦЕПЬ СТАТОРА КОНДЕНСАТОРАМИ

Ключевые слова: асинхронный двигатель, пусковой ток, конденсаторный пуск.

Приводятся результаты математического моделирования конденсаторного пуска асинхронного двигателя.

Keywords: induction motor, start current, capacitor start.

Results of mathematical modeling of the capacitor start induction motor are given.

Проблемой прямого пуска крупного асинхронного двигателя (АД) или двигателя, мощность которого соизмерима с мощностью автономной сети, является значительное снижение напряжения сети, что негативно влияет и на двигатель, и на остальную нагрузку сети. Традиционные способы ограничения пускового тока, такие как реакторный пуск, пуск переключением обмоток со звезды на треугольник, пуск с помощью тиристорных преобразователей, не позволяют оптимально решить задачу пуска. Кроме того, при использовании этих способов ухудшается и без того низкий пусковой коэффициент мощности сети [1].

Более эффективно для пуска мощных АД применять последовательное включение с обмотками статора конденсаторов, которые после пуска переключаются параллельно сети, обеспечивая компенсацию реактивной мощности двигателя в рабочем режиме. При пуске асинхронного двигателя с помощью последовательно подключенных к статорным обмоткам конденсаторов напряжение, приложенное к обмоткам статора двигателя, уменьшается на величину падения напряжения на сопротивлениях конденсаторов, что в свою очередь ограничивает пусковой ток в обмотках статора. По мере увеличения частоты вращения двигателя ток в обмотках статора уменьшается, а напряжение, приложенное к обмоткам статора, увеличивается и при достижении определенного значения двигатель подключается напрямую.

Для исследования пуска АД с помощью последовательно подключенных к обмоткам статора конденсаторов в программном комплексе МВТУ 3.7 создана модель пускового устройства на основе представленной в [2] системы дифференциальных уравнений.

Так, электромагнитные процессы, происходящие в АД при пуске, описываются формулами [2]:

$$\begin{cases} u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} + u_{CA}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} + u_{CB}; \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt} + u_{CC}; \\ 0 = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \end{cases}$$

Здесь u_A, u_B, u_C – значения фазных напряжений статора; $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$ – активные сопротивления обмоток статора и приведенные активные сопротивления обмоток ротора; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ – фазные токи статора и ротора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток; u_{CA}, u_{CB}, u_{CC} – падение напряжения на конденсаторах в фазах двигателя.

Потокосцепление АД определяется выражением в матричной форме:

$$\psi = [M] \times [i],$$

где $[\psi] = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c]$ – матрица-столбец потокосцеплений; $[i] = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]$ – матрица-столбец токов; $[M]$ – матрица индуктивностей.

Падение напряжения на пусковых конденсаторах в фазах двигателя определяется из выражения:

$$\begin{cases} u_{CA} = \frac{1}{C} \int i_A dt; \\ u_{CB} = \frac{1}{C} \int i_B dt; \\ u_{CC} = \frac{1}{C} \int i_C dt, \end{cases}$$

где C – емкость пусковых конденсаторов, в установившемся режиме $u_{CA} = u_{CB} = u_{CC} = 0$.

Уравнение электромагнитного момента АД имеет вид:

$$M_{ЭМ} = \frac{\sqrt{3}}{2} p M [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)],$$

где M – взаимная индуктивность; p – число пар полюсов АД.

Проведены исследования пуска асинхронного двигателя АИР80А2У3. Параметры АД: $P_n=1,5$ кВт, $n_n=2850$ об/мин, $R_1=5,612$ Ом, $L_1=0,017$ Гн, $R_2=3,465$ Ом, $L_2=0,024$ Гн, $L_m=0,446$ Гн, $J_d=0,0018$ кг/м². Нагрузкой для моделируемого двигателя служит момент сопротивления, величина которого находится в квадратичной зависимости от частоты вращения двигателя (вентиляторная нагрузка).

На рис. 1 показано действующее значение фазного тока статора АД при значении пусковой емкости $C_n=80$ мкФ.

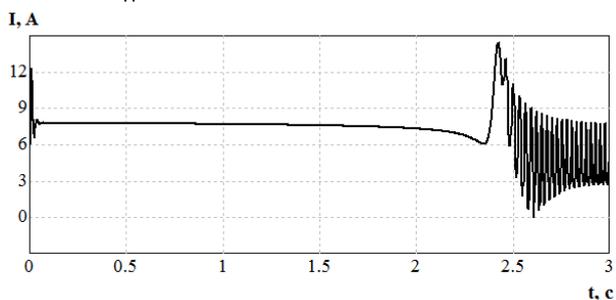


Рис. 1 – Пусковой ток АД с последовательно подключенными конденсаторами

Как видно на рисунке, в определенный момент разгона асинхронного двигателя при питании его через конденсаторы, подключенные последовательно со статорными обмотками, возникают резонансные явления, препятствующие дальнейшему разгону АД. Для исключения этого режима двигатель отключается от конденсаторов в момент, когда ток статора начинает резко расти (Рис. 2).

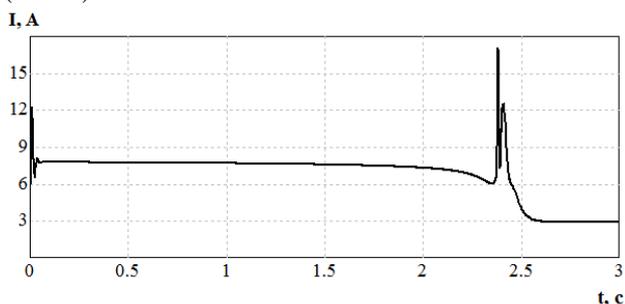


Рис. 2 – Пусковой ток АД с последовательно подключенными конденсаторами и переключением напрямую в сеть

Переключение АД при питании его через конденсаторы, подключенные последовательно со статорными обмотками, на сетевое напряжение приводит к появлению нежелательных переходных процессов, сопровождающихся скачками тока (рис. 2) и появлению тормозного момента на валу асинхронного двигателя (рис. 3).

Причина возникновения этих переходных процессов - несовпадение по фазе вектора ЭДС статора АД с вектором напряжения сети в момент подключения АД к сети.

Обеспечить совпадение векторов напряжения сети и ЭДС статора асинхронного двигателя возможно, если перед подключением двигателя к сети выдержать бестоковую паузу.

Напряжение сети имеет стабильную частоту, а ЭДС статора асинхронного двигателя при выбеге имеет частоту, равную частоте вращения ротора, поэтому векторы напряжения сети и ЭДС статора в процессе выбега могут многократно совпадать по направлению или находиться в противофазе. Следовательно, если перед подключением асинхронного двигателя к сети выдержать бестоковую паузу, и подключить двигатель к сети в момент, когда вектор напряжения сети и вектор ЭДС совпадут, то бросок тока будет минимальным (Рис.4). Также в этом случае не возникает тормозной момент.

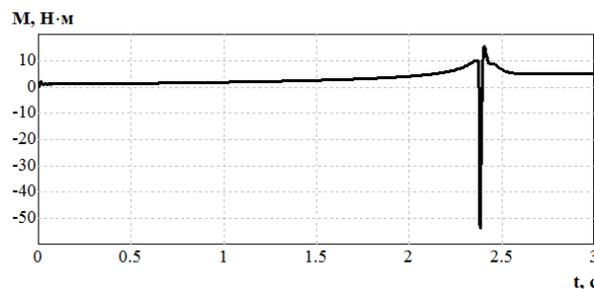


Рис.3 – Электромагнитный момент при переключении АД на сетевое напряжение при конденсаторном пуске ($C_n=80$ мкФ)

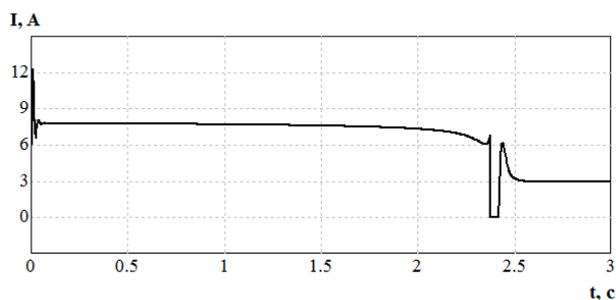


Рис. 4 – Ток фазы АД при конденсаторном пуске с выдержкой бестоковой паузы ($C_n=80$ мкФ)

Для определения момента времени, в который совпадают по фазе вектор напряжения сети и вектор ЭДС статора АД находятся проекции фазного напряжения сети и ЭДС статора на неподвижную систему координат x-y с помощью формул:

$$\begin{cases} u_x = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{1}{2}(u_B + u_C) \right); \\ u_y = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_B - u_C), \end{cases}$$

где u_A, u_B, u_C – значения фазных напряжений.

После этого определяются фазовые углы с помощью формулы:

$$\begin{cases} \varphi = \arctg\left(\frac{u_y}{u_x}\right), \text{ если } u_x \geq 0; \\ \varphi = \pi + \arctg\left(\frac{u_y}{u_x}\right), \text{ если } u_x < 0. \end{cases}$$

В момент времени, когда равны фазовые углы вектора напряжения сети и вектора ЭДС обмотки статора АД подключается к сети.

Выводы

1. Для снижения бросков тока в момент подключения двигателя к сети необходимо выдержать бестоковую паузу.
2. Для максимального снижения броска тока АД к сети после выбега необходимо подключать при совпадении вектора напряжения сети и вектора ЭДС статора.

Литература

1. Гандин Б.Д., Гревнин Г.Р., Лазаревский Н.А. Пуск асинхронных электродвигателей. - Л.: Судостроение. 1980. - 192 с., ил.

2. В.Н.Дмитриев, А.А.Горбунов, Е.Н.Гаврилов. Исследование пусковых режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя в зарезонансную зону.
3. Тумаева Е.В. Подобие оптимальных зависимостей токов в синхронном двигателе с электромагнитным возбуждением на базе теории обобщенной машины. – Вестник Казанского технол. ун-та. - №2, Т.16, с. 158-159.
4. Амирова С.С. Абдурагимов Р.А., Исаев А.А. Совершенствование управления энергосбережением цеха 2104 завода «Этилен». - Вестник Казанского технол. ун-та. - №2, Т.16, с. 180-181.

© **Н.И. Горбачевский** – канд. тех. наук, заведующий кафедрой электротехники и энергообеспечения предприятий НХТИ КНИТУ, aer-nk@mail.ru; И.Ф.Афлятунов – аспирант УлГТУ, ст. преп. кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий НХТИ КНИТУ, aif_69@inbox.ru.