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]: 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:
$$\psi = [M] \cdot i$$
 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:
$$u_{CA} = u_{CB} = u_{CC} = 0$$
 где C – емкость пусковых конденсаторов, в установившемся режиме $u_{CA} = u_{CB} = u_{CC} = 0$. Уравнение электромагнитного момента АД имеет вид:
$$M = p \cdot \psi_a \cdot i_b - \psi_b \cdot i_a$$
 где M – взаимная индуктивность; p – число пар полюсов АД. Проведены исследования пуска асинхронного двигателя АИР80А2УЗ. 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 $C_P=80$ 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 ($C_P=80$ мкФ) Рис. 4 – Ток фазы АД при конденсаторном пуске с выдержкой бестоковой паузы ($C_P=80$ 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: где u_A, u_B, u_C – значения фазных напряжений. После этого определяются фазовые углы с помощью формулы: 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.