

ПУСК АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ОТ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ИНВЕРТОРА И СЕТИ

Жемеров Г.Г., д.т.н., проф., Колесник В.Ю.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника", тел. (057) 707-66-09, факс (057) 707-63-12, E-mail: zhemerov@online.kharkiv.net

У статті розглядається система пуску асинхронної машини на основі автономного інвертора напруги з ШИМ і подальшим перемиканням на мережу. Особливістю системи пуску є наявність інтервалу паралельної роботи інвертора та мережі. Приведені осцилограми, що характеризують процес пуску при різних значеннях моменту на валу машини.

В статті розглядається система пуску асинхронної машини на основі автономного інвертора напруги з ШИМ і подальшим перемиканням на мережу. Особливістю системи пуску є наявність інтервалу паралельної роботи інвертора та мережі. Приведені осцилограми, що характеризують процес пуску при різних значеннях моменту на валу машини.

ВВЕДЕНИЕ

Система пуска асинхронной машины (АМ) на основе автономного инвертора напряжения с ШИМ (СП АИН) может быть синтезирована с использованием структуры системы управления, описанной в [1], хотя СП АИН имеет некоторые отличия, заключающиеся в следующем. В описанной в [1] системе пуска осуществляется естественное ограничение частоты напряжения статора частотой питающей сети, поскольку перемодуляция в системе управления с одновременным увеличением частоты сигнала задания приводит к трансформации режима непосредственно преобразователя частоты (НПЧ) системы в режим тиристорного регулятора напряжения (ТРН) с углами управления, соответствующими полному напряжению на выходе ТРН. Поэтому в системе пуска на основе НПЧ (СП НПЧ) процесс заканчивается естественным подключением АМ к промышленной сети, после чего НПЧ может быть зашунтирован контактором.

В СП АИН, использующей структуру системы автоматического регулирования, описанную в [1], частота напряжения статора будет увеличиваться неограниченно или, в случае, если статический момент увеличивается при увеличении частоты вращения вала, – до момента равенства заданного электромагнитного момента и момента нагрузки.

В настоящей статье рассмотрено построение системы пуска на основе автономного инвертора напряжения с модифицированной системой автоматического регулирования, которая позволяет провести синхронизацию напряжения АМ с напряжением питающей сети и осуществить подключение разогнанной машины непосредственно к сети.

СТРУКТУРА СП АИН

Структура СП АИН показана на рис. 1. Система содержит трехфазный автономный инвертор напряжения (АИН), который питается от неуправляемого выпрямителя В, подключенного к сети через преобразовательный трансформатор Тр. Обмотки статора АМ подключены к инвертору через фильтр, включающий реакторы L_{ϕ} и конденсаторы C_{ϕ} , который сглаживает пульсации напряжения и тока статора с частотами ШИМ. В системе содержится два быстродействующих автоматических выключателя – Q1, предназна-

ченный для подключения обмоток статора АМ к сети, и Q2, предназначенный для отключения инвертора от обмоток АМ. Автоматический выключатель Q2 включен между реакторами и конденсаторами фильтра. Для предотвращения пробоя полупроводниковых приборов инвертора при размыкании выключателя Q2 реакторы зашунтированы разрядниками (Р) с напряжением пробоя 20 kV.

На рисунке также показаны блоки, измеряющие линейные напряжения сети u_s , линейные напряжения на выходе автономного инвертора u_i , линейные напряжения на зажимах статора АМ u_m , а также фазные токи статора АМ i_m , формирующие информационные сигналы для системы управления СУ. Для управления АМ используется векторная система управления с ориентацией продольной оси по вектору потокосцепления ротора.

Рассмотрим, как осуществляется пуск машины, синхронизация выходного напряжения АИН с напряжением сети и переключение на сеть.

В исходном состоянии автоматические выключатели Q1 и Q2 разомкнуты. Алгоритм пуска и подключения АМ к сети следующий:

1. Включается автоматический выключатель Q2;
2. АМ разгоняется приблизительно до частоты сети с помощью АИН;
3. Синхронизируются и выравниваются по амплитуде напряжения инвертора и сети;
4. По сигналу датчика синхронизации включается автоматический выключатель Q1 и отключается автоматический выключатель Q2.

Понятно, что процесс переключения выключателей не может произойти мгновенно. Поэтому в течение какого-то интервала времени сеть и АИН окажутся включенными параллельно и необходимо принятие специальных мер для ограничения величины токов в этом контуре;

Понятно, что процесс переключения выключателей не может произойти мгновенно. Поэтому в течение какого-то интервала времени сеть и АИН окажутся включенными параллельно и необходимо принятие специальных мер для ограничения величины токов в этом контуре;

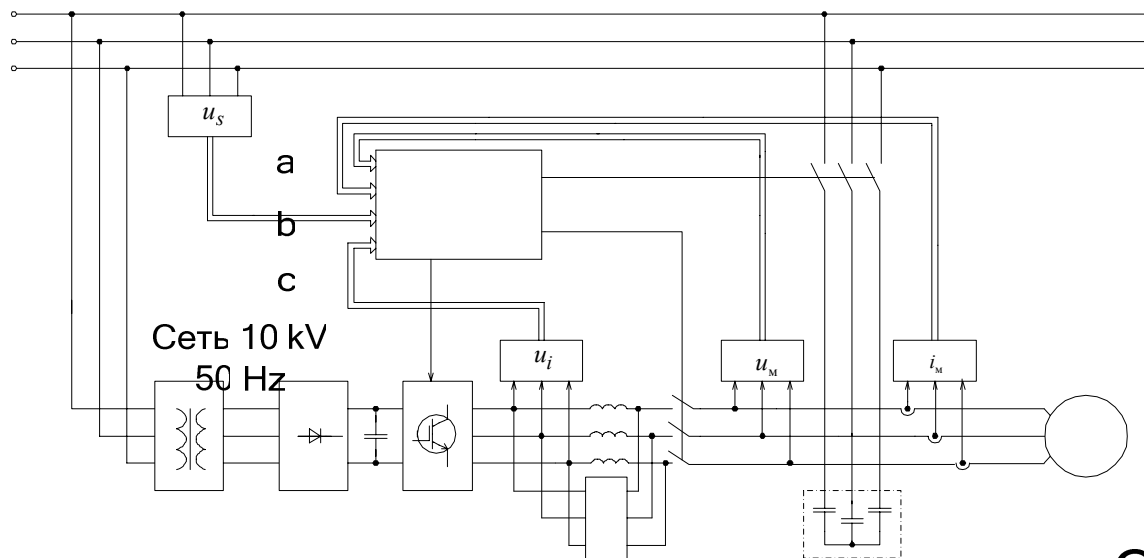


Рис. 1. Структура системы пуска на основе автономного инвертора напряжения

СУ

Для того чтобы при переключении автоматических выключателей не было броска тока в обмотках статора АИН необходимо выполнить 2 условия:

1. В момент переключения напряжение на выходе АИН должно совпадать с напряжением сети по амплитуде, частоте и фазе;

2. На интервале параллельной работы АИН и сети необходимо поддерживать равенство выходного напряжения АИН и напряжения сети.

В предложенной СП АИН выполнение первого условия осуществляется путем изменения структуры системы регулирования как показано на рис. 2.

Трехфазная система напряжения управления АИН формируется из двух сигналов задания по проекциям тока статора на оси вращающейся системы координат. При этом проекция тока на продольную ось пропорциональна значению потокосцепления ротора, а проекция тока на поперечную – значению электромагнитного момента на валу [2]. Поэтому в процессе разгона достаточно поддерживать постоянными сигналы задания по потокосцеплению и моменту.

В конечной стадии пуска при частоте вращения вала машины, близкой к номинальному значению, электромагнитный момент на валу машины становится примерно равным механическому моменту. Для синхронизации выходного напряжения инвертора сети с напряжением необходимо перейти от системы с регулятором момента к системе с регулятором скорости (РС). В момент времени, когда скорость вращения вала превышает некоторое пороговое значение ω_n , примерно равное 0,9 от номинальной скорости вращения, ключ переключает вход канала регулятора тока на САР по скорости. В реальной схеме присутствует триггер, осуществляющий переключение, не показанный на рис. 2. Сигнал обратной связи по скорости формируется путем прохождения разностного сигнала $\Delta\omega$ через ПИ-регулятор фазы (РФ). Такая система позволяет поддерживать скорость вращения вала постоянной и равной заданному значению ω^* .

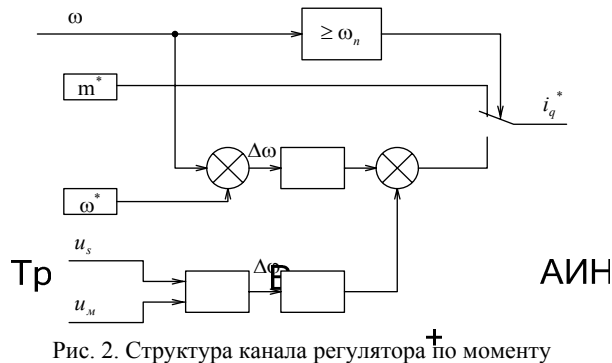


Рис. 2. Структура канала регулятора по моменту

АИН

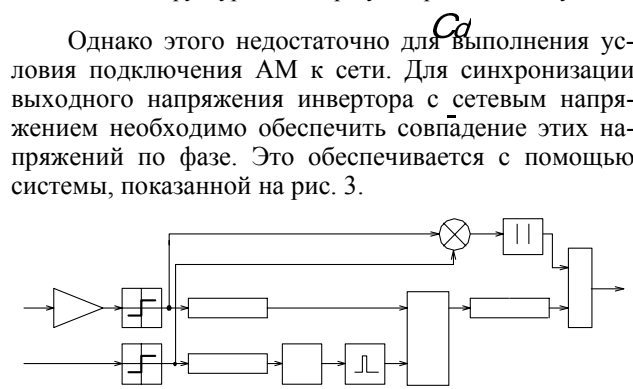


Рис. 3. Структура канала регулятора по фазе

Очевидно, что разностный сигнал по фазе нельзя получить простым вычитанием напряжений сети u_s и АИН u_i . Это объясняется тем фактом, что эти напряжения не совпадают по амплитуде, а выходное напряжение АИН содержит также высокочастотные пульсации. Сглаживание этих пульсаций фильтром с низкой частотой среза приводит к сдвигу по фазе на основной частоте. Поэтому используется более сложный алгоритм.

На рис. 4 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие процесс синхронизации. Диаграммы в левой части рисунка соответствуют интервалу, когда напряжение сети опережает выходное напряжение инвертора, а диаграммы в правой части – когда напряжение сети отстает от напряжения инвертора.

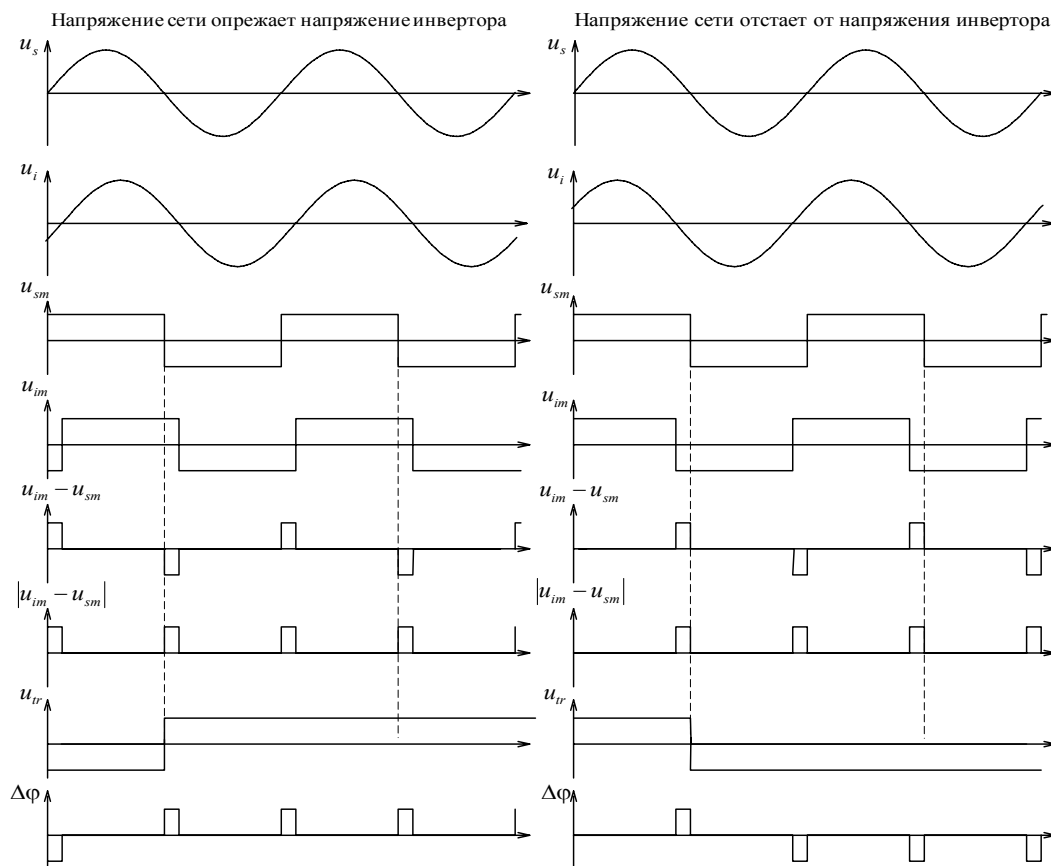


Рис. 4. Диаграммы синхронизации напряжении сети и АИН

Как видно из приведенных на рис. 4 диаграмм напряжения сети u_s и инвертора u_i преобразуются к меандрам единичной амплитуды u_{sm} и u_{im} соответственно. Напряжение сети предварительно инвертируется. Сложение сигналов $-u_{sm}$ и u_{im} дает разностный сигнал в виде разнополярных импульсов, длительность которых пропорциональна сдвигу фазы между напряжениями сети и инвертора. Необходимо определить знак этого сдвига. Для этого используется D-триггер, на информационный вход D которого подается логический сигнал, равный логической 1 при положительном значении напряжения АИН и логическому 0 – при отрицательном значении, а на вход синхронизации подается логический сигнал, равный логической 1 при положительном значении напряжения сети и логическому 0 – при отрицательном значении. Выходной сигнал триггера преобразуется в меандр единичной амплитуды u_{tr} . Результирующий разностный сигнал ошибки по фазе $\Delta\phi$ получается путем перемножения этого сигнала с импульсами, длительность которых пропорциональна фазовому сдвигу. Для подстройки выходного напряжения инвертора по фазе полученный разностный сигнал пропускается через ПИ регулятор и суммируется с сигналом обратной связи по скорости.

Специального рассмотрения требует задача определения условия синхронизации выходного напряжения АИН с напряжением сети. Этому условию теоретически соответствует нулевая длительность разностных импульсов, однако зафиксировать ее достаточно сложно, поэтому критерием синхронизации является длительность разностного импульса меньшая определенного значения. В цифровой системе управления решение этой задачи не представляет существ-

венной сложности, можно зафиксировать импульсы длительностью до $100 \mu s$, что соответствует углам сдвига $1,8$ электрических градусов. В аналоговой системе управления необходимо использовать системы сдвига на RC-цепях. Естественно точность в таком случае оказывается заметно ниже, однако для безаварийного переключения на сеть достаточно угла сдвига $5-10$ электрических градусов.

Как было отмечено выше, после срабатывания автоматического выключателя Q1 необходимо поддерживать выходное напряжение АИН равным напряжению в сети.

Непосредственно перед коммутацией это условие выполняется. Однако в исследуемой системе управления амплитуда и угол поворота вектора потокосцепления ротора определяются путем интегрирования напряжения статора. В момент переключения присутствует некоторая кратковременная несимметрия напряжений и токов статора, которая вносит существенную ошибку в формирование напряжения управления. Естественным представляется использование на этапе параллельной работы сети и инвертора напряжения сети u_s в качестве напряжений управления инвертора u_y . Для этого необходимо трансформировать структуру системы управления так, как показано на рис. 5.

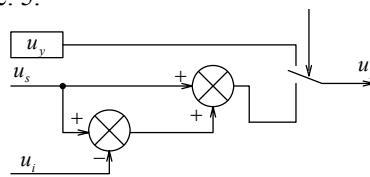


Рис. 5. Структура формирования напряжения управления на интервале коммутации

Отметим, что если коэффициент несинусоидальности напряжения сети относительно велик, то искажения напряжения сети могут оказывать влияние на интервале совместной работы сети и инвертора. Поэтому необходима отрицательная обратная связь по выходному напряжению инвертора u_i .

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СП АИН

Рассчитаем основные элементы системы пуска асинхронной машины с короткозамкнутым ротором мощностью 630 kW. Номинальное линейное напряжение статора составляет 10 kV, а номинальный ток статора – 40,4 А.

Расчет емкости конденсатора в цепи постоянного тока инвертора проводится из условия поддержания напряжения с заданной амплитудой пульсации при максимальном токе нагрузки. Требуемую емкость можно приблизительно определить, пренебрегая пульсациями выходного напряжения выпрямителя из следующего выражения:

$$C_d = \frac{I_d \cdot \Delta t}{\Delta U} \quad (1)$$

I_d – входной ток инвертора, принимаем равным 75 А (что соответствует значению момента 1,35 от номинала, поддерживаемому в процессе пуска); Δt – интервал времени, между подзарядками конденсатора от сети (примерно 10 ms); ΔU – допустимый провал напряжения, принимаем равным 750 В.

Тогда емкость конденсатора C_d составляет:

$$C_d = \frac{75 \cdot 0.01}{750} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ F.}$$

Расчет элементов фильтра на выходе АМ носит компромиссный характер.

Наибольшую проблему вызывает определение индуктивности реактора фильтра L_ϕ . С одной стороны, чем больше индуктивность L_ϕ , тем лучше сглаженной будет форма выходного напряжения на АМ. А с другой стороны, эта индуктивность включена последовательно с обмотками статорам АМ и оказывает влияние на процессы в машине. При моделировании установлено, что добиться устойчивости регуляторов СУ СП АИН возможно при значении индуктивности L_ϕ равной 50% от индуктивности рассеяния статора. То есть индуктивность реактора составляет 20 мН.

Амплитуда старшей гармоники выходного напряжения инвертора с частотой ШИМ примерно равна $0.4 \cdot U_d$. Тогда амплитуда тока этой частоты составляет:

$$I_{\text{ШИМ}} = \frac{0.4 \cdot U_d}{\omega \cdot L_\phi \cdot k} \quad (2)$$

где $k = f_{\text{ШИМ}} / f_c = 5000 / 50 = 100$.

$$I_{\text{ШИМ}} = \frac{0.4 \cdot 15000}{314 \cdot 0.02 \cdot 100} = 9.5 \text{ A.}$$

Несмотря на то, что таких высших гармоник тока много, суммарное действующее значение всех высших гармоник тока все-таки меньше номинального тока статора АМ.

Активное сопротивление реактора фильтра выбираем равным 1% от индуктивного сопротивления на частоте сети 50 Hz, то есть $r_\phi = 0,063 \Omega$.

Выбор емкости конденсатора также неоднозначен. Очевидно, что для улучшения фильтрации высокочастотных пульсаций желательно повышать вели-

чину этой емкости. А с другой стороны при увеличении этой емкости резонансная частота фильтра приближается к частоте сети 50 Hz, что недопустимо. В предложенной системе пуска емкость конденсаторов фильтра выбрана равной $5 \mu\text{F}$.

Электромагнитные процессы на интервале параллельной работы автономного инвертора и сети можно рассматривать с использованием эквивалентной схеме, представленной на рисунке 6. В этой схеме условно введена нулевая точка сети, инвертора и нагрузки. Асинхронная машина представлена схемой замещения, соответствующей на конечной стадии пуска последовательному включению активного сопротивления статора r_m , индуктивности рассеяния статора L_m , и противоЭДС e .

Необходимо также учесть сопротивление и индуктивность в цепях сети (r_c, L_c) и инвертора (r_ϕ, L_ϕ).

Индуктивность сети L_c определяется по мощности короткого замыкания $P_{кз}$.

$$L_c = \frac{U_\Delta^2}{\omega \cdot P_{кз}} \quad (3)$$

Подставляя в (3) значение действующего линейного напряжения 10 kV, угловой частоты 314 1/s и мощности короткого замыкания 30 MW, получим:

$$L_c = \frac{10^4}{314 \cdot 3 \cdot 10^7} = 0.0106 \text{ Гн.}$$

Активное сопротивление сети принимаем равным 1 Ω .

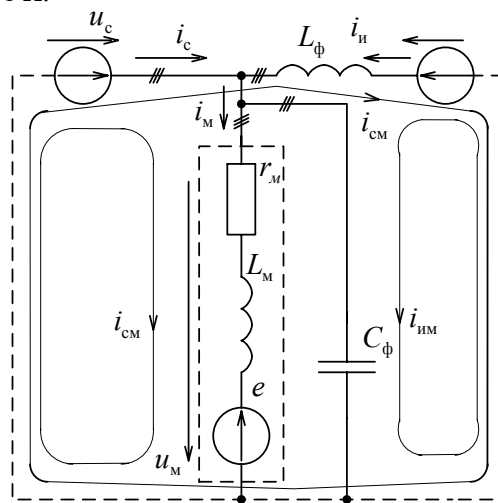


Рис. 6. Эквивалентная схема СП АИН на этапе коммутации

Влиянием конденсаторов фильтра C_ϕ можно пренебречь, поскольку на интервале коммутации рассматриваются переходные процессы с частотой сети, а сопротивление конденсаторов фильтра переменному току частотой 50 Hz составляет 640Ω (в 4 раза больше базового сопротивления АМ).

С учетом принятых допущений можно выделить в схеме 3 тока: i_c – ток сети, i_in – ток инвертора, i_m – ток машины. Эти токи содержат вынужденную и свободную составляющие. Анализ осциллограмм, полученных при моделировании системы пуска, показывает, что длительность переходного процесса не превышает 5-10 ms. Поэтому для упрощения анализа можно пренебречь свободной составляющей и ограничиться расчетом установившегося режима. Для определения токов в установившемся режиме можно воспользоваться методом контурных токов. Выделим 3 контура,

как показано на рисунке 6, с токами i_{CM} , i_{CI} , i_{IM} . Значения контурных токов равны:

$$\begin{cases} i_{CM} = \frac{u_c - e}{\sqrt{(r_c + r_M)^2 + (\omega(L_c + L_M))^2}} \\ i_{CI} = \frac{u_c - u_{II}}{\sqrt{(r_c + r_{II})^2 + (\omega(L_c + L_{II}))^2}} \\ i_{IM} = \frac{u_{II} - e}{\sqrt{(r_M + r_{II})^2 + (\omega(L_M + L_{II}))^2}} \end{cases} \quad (4)$$

Токи сети, инвертора и машины определяются следующим образом:

$$\begin{cases} i_c = i_{CM} + i_{CI} \\ i_M = i_{CM} + i_{IM} \\ i_{II} = i_{IM} - i_{CM} \end{cases} \quad (5)$$

Анализируя систему уравнений (5) можно сделать следующий вывод: для обеспечения переключения машины на сеть без бросков момента на валу, необходимо минимизировать ток i_{IM} , поскольку ток i_{CM} , примерно равен установившемуся току АМ непосредственно перед коммутацией. Однако, в таком случае ток инвертора i_{II} полностью равен контурному току i_{CI} . Величина тока i_{CI} пропорциональна разности напряжения сети и инвертора, то есть на интервале коммутации необходимо поддерживать первую гармонику напряжения на выходе инвертора примерно равной напряжению сети.

Определим требуемую точность поддержания выходного напряжения инвертора на этапе коммутации. Предположим, что амплитудное значение тока инвертора на этом этапе составляет 200% от номинального тока АМ, то есть 114 А. Тогда разность напряжений сети и инвертора не должна превышать

$$\begin{aligned} (u_c - u_{II})_{\max} &= i_{CI} \cdot \omega \cdot (L_{\Phi} + L_c) \\ (u_c - u_{II})_{\max} &= 114 \cdot 314 \cdot (0,02 + 0,0106) = 1095 \text{ В} . \end{aligned} \quad (6)$$

Описанный выше регулятор напряжения управления позволяет поддерживать разностное напряжение не более чем 1000 В на всем интервале коммутации.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СП АИН

Моделирование комбинированной системы пуска проведено с помощью программного пакета Matlab Simulink/SimPowerSystem [3].

Создана дискретная модель с фиксированным шагом счета (при моделировании значение шага по умолчанию уменьшено в два раза - до 1 μ s для повышения точности расчетов). Это существенно ускорило скорость моделирования, и сняло некоторые ограничения, характерные для моделей с непрерывными состояниями и переменным шагом счета.

Система управления построена в относительных единицах. Все параметры, связанные с асинхронной машиной, выведены в отдельный блок констант. Это позволяет достаточно просто проводить моделирование для АМ различной мощности и конструкции и анализировать подобие процессов пуска.

При моделировании относительное сопротивление обмоток статора и ротора принято 0,035 (абсолютное значение 5 Ω), относительная индуктивность рассеяния статора и ротора - 0,1 (абсолютное значение 44,5 мН), относительная индуктивность контура намагничивания - 3,0 (абсолютное значение 1,35 Н).

Моделирование проводилось при изменении относительного механического момента нагрузки, приведенного к валу, от 0,1 до 1 с шагом 0,1.

Сигналы заданий в относительных единицах устанавливались следующие: по электромагнитному моменту устанавливался равным 1,35, а по потокосцеплению ротора - 0,7.

Результаты моделирования при значении приведенного механического момента нагрузки на валу равном 20% приведены на рис. 7-8, а при значении приведенного механического момента нагрузки 100% от номинального электромагнитного момента (4011 Н·м) - на рис. 9-10.

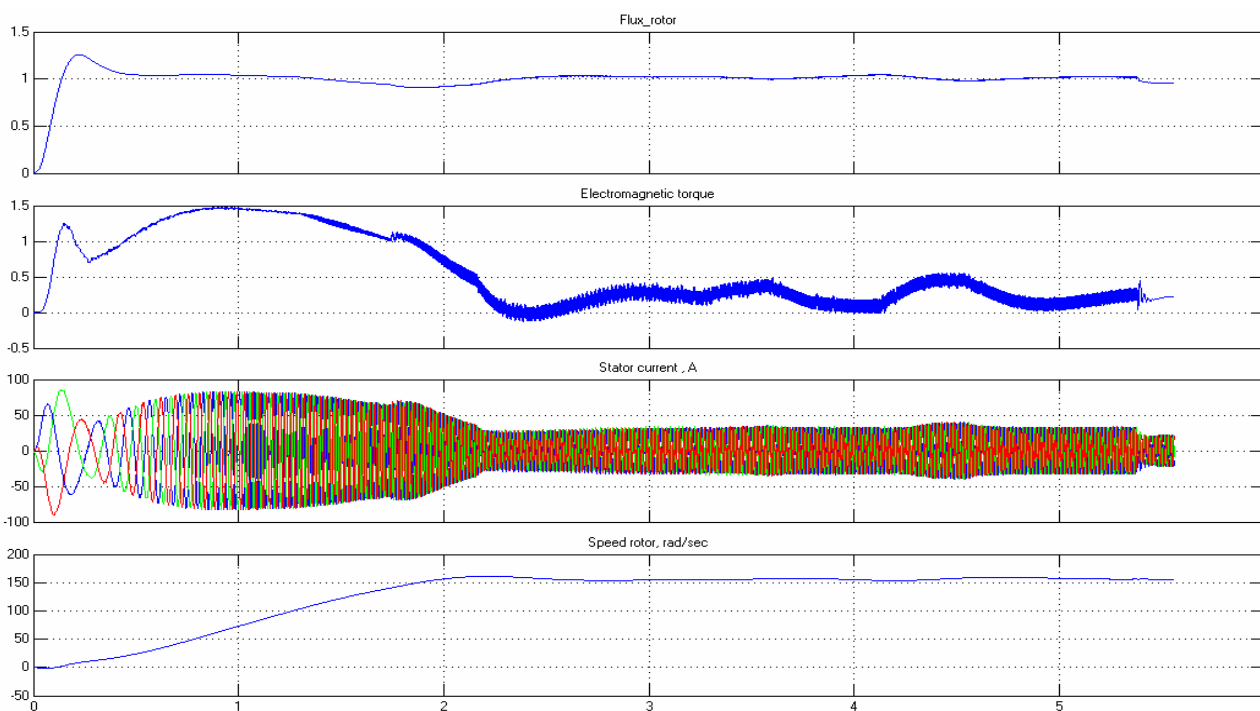


Рис. 7. Результаты моделирования пуска с моментом на валу равным 20% от номинального

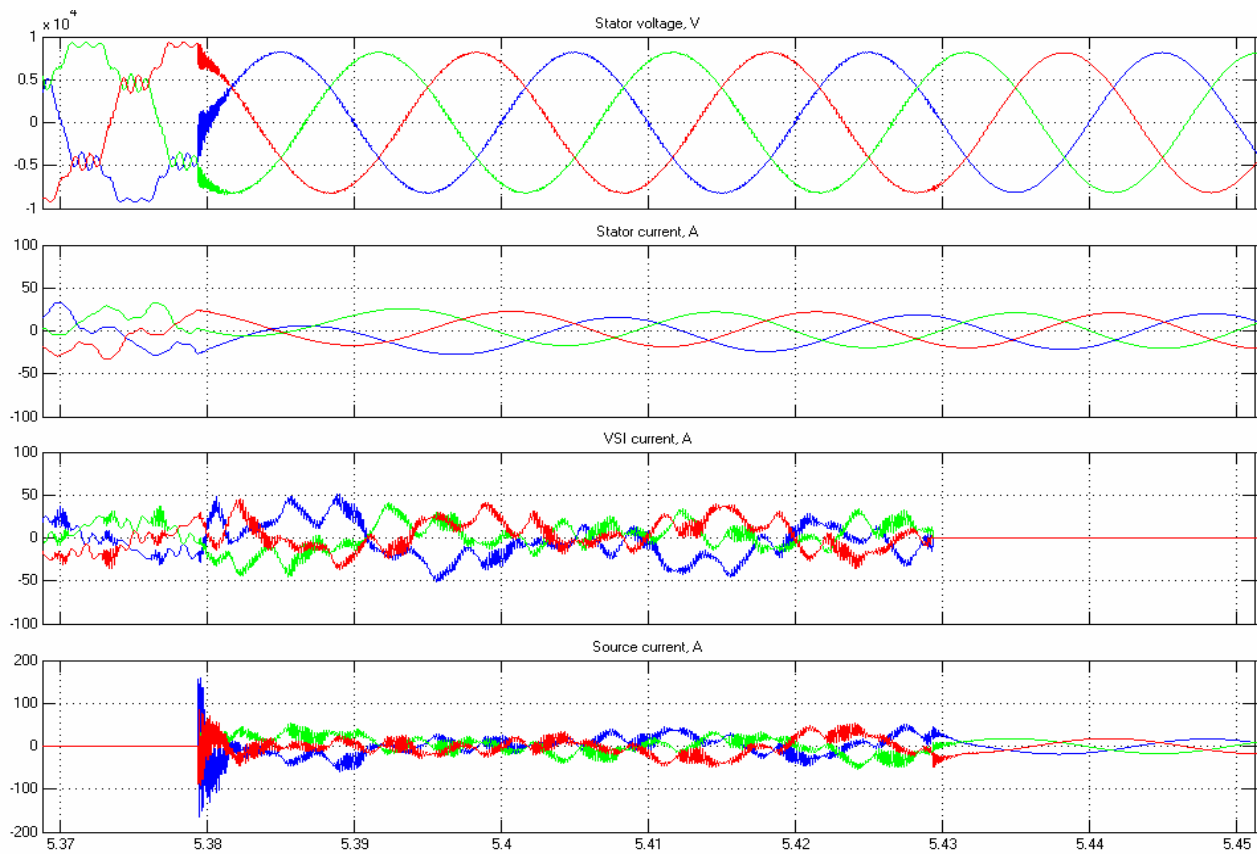


Рис. 8. Результаты моделирования пуска с моментом на валу равным 20% от номинального (процесс переключения на сеть)

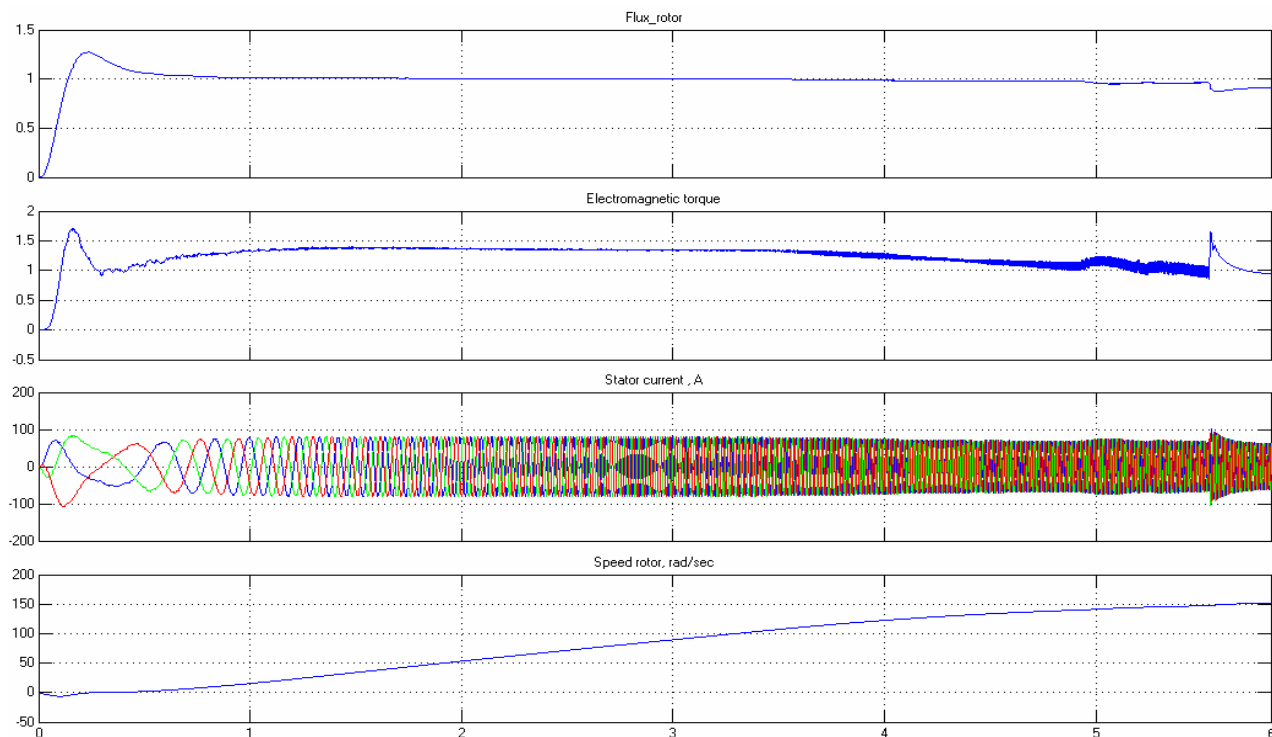


Рис. 9. Результаты моделирования пуска с номинальным моментом на валу

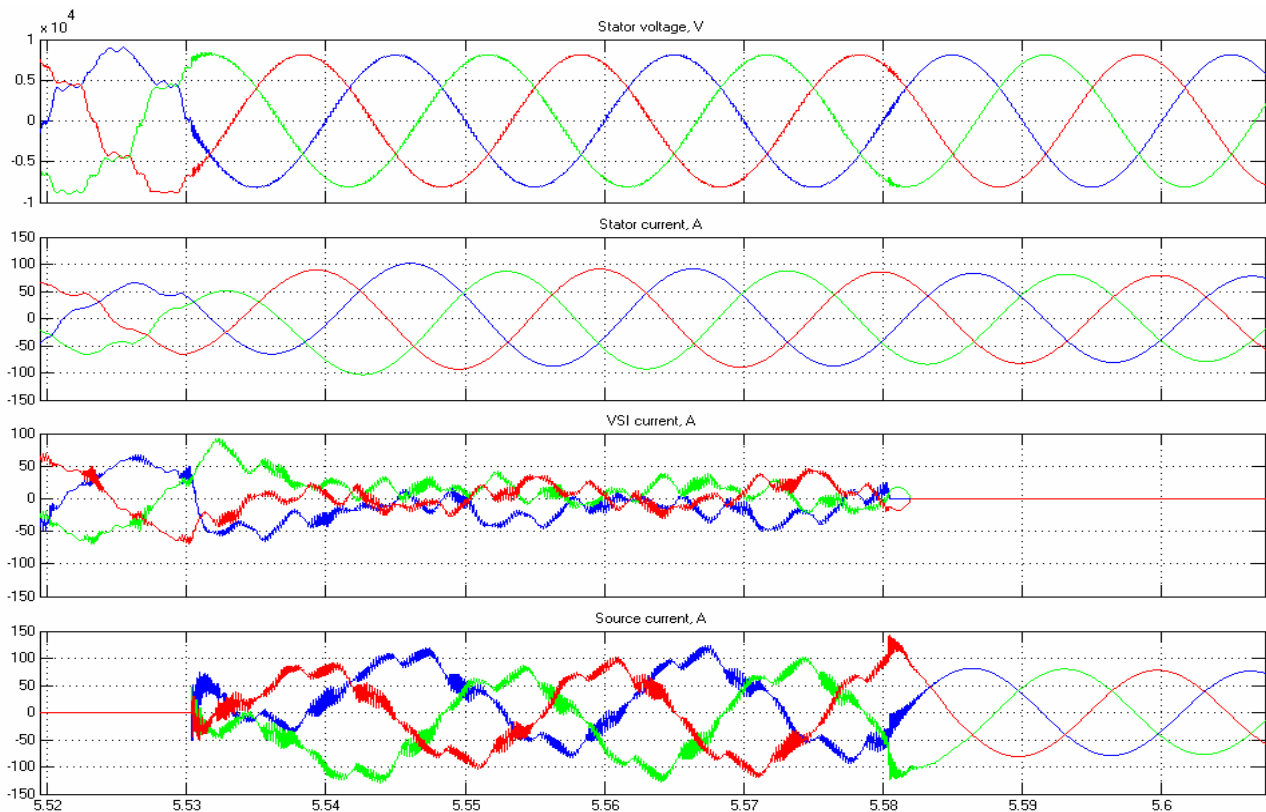


Рис. 10. Результаты моделирования пуска с номинальным моментом на валу (процесс переключения на сеть)

На рис. 7 и 9 показаны, соответственно, потокосцепление ротора и электромагнитный момент в относительных единицах, а также ток статора и скорость вращения вала в абсолютных единицах на всем интервале пуска. На рис. 8 и 10 показано напряжение на статоре, ток статора, ток инвертора и ток сети в таком масштабе, чтобы было видно интервал параллельной работы инвертора и сети. При моделировании предполагалось, что автоматический выключатель, отключающий инвертор, размыкается через 50 ms после подключения машины к сети.

Как видно из приведенных осциллограмм в процессе пуска четко выделяются 4 участка:

1. Разгон от АИН до скорости 140 1/s (при этом потокосцепление равно 1, а момент 1,35 от номинального значения);
2. Подстройка частоты и фазы выходного напряжения АИН для синхронизации с напряжением сети (при этом электромагнитный момент зависит от момента нагрузки);
3. Интервал параллельной работы сети и инвертора;
4. Работа АМ от сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система пуска асинхронной машины на основе автономного инвертора напряжения с ШИМ позволяет осуществить разгон АМ при любом законе изменения момента нагрузки на валу.

После разгона происходит синхронизация выходного напряжения инвертора с напряжением в питающей сети и переключение асинхронной машины на сеть.

Методом компьютерного математического моделирования подтверждена возможность переключения с интервалом параллельной работы инвертора и сети.

Преимуществом предложенной системы, по сравнению с СП на основе преобразователей ведомых сетью, является ограничение тока статора АМ на заданном уровне на всем интервале пуска.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Система пуска асинхронной машины на основе трехпульсного трехфазно-трехфазного непосредственного преобразователя частоты. "Технічна електродинаміка". Темат. Вып. "Силовая електроніка та енергоефективність" ч. 2, 2005 С. 73-80.
- [2] Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
- [3] Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.

Поступила 25.10.2007