

*к.т.н. Скурятин Ю.В.,
Денисевич Н.А.
(ДонГТУ, г.Алчевск, Украина)*

АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО СОВМЕСТИМЫЙ С НАГРУЗКОЙ

Розглядається автономний інвертор напруги з вихідним LC фільтром та керуванням на ковзних режимах. Показана можливість забезпечення електромагнітної сумісності перетворювача з навантаженням.

***Ключові слова:** ковзний режим, напівпровідниковий перетворювач, електромагнітна сумісність.*

Рассматривается автономный инвертор напряжения с выходным LC фильтром и управлением на скользящих режимах. Показана возможность обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя с нагрузкой.

***Ключевые слова:** скользящий режим, полупроводниковый преобразователь, электромагнитная совместимость.*

Постановка задачі. В настоящее время благодаря увеличению в структуре современного электропривода доли электроприводов переменного тока широкое распространение в технике получили преобразователи частоты на базе автономного инвертора напряжения (АИН).

Известно, что АИН, работающие, как правило, в режиме импульсной модуляции, являются источниками высших гармоник. При работе на асинхронный двигатель это приводит к повышению потерь, негативному влиянию на состояние изоляции обмотки статора. Формирование синусоидальных токов посредством использования ШИМ или релейного управления [1–4] уменьшает потери от высших гармоник в токе статора, однако не решает проблемы влияния на состояние изоляции обмоток. Применение многоуровневых инверторов с поуровневой ШИМ [5, 6] уменьшает также и уровень высших гармоник в выходном напряжении, но в силу усложнения схемы и повышения ее стоимости целесообразно только в высоковольтных преобразователях большой мощности. Снижения уровня высших гармоник можно добиться с помощью трехфазного LC-фильтра подключенного к выходу АИН. Недостатком такого способа является ухудшение динамики преобразователя.

Решение данной проблемы может быть достигнуто применением эффективного управления, обеспечивающего требуемую форму выходного напряжения и высокое быстродействие. Одним из перспективных в этом смысле методов управления является разрывное управление на скользящих режимах [7, 8]. Системы, в которых преднамеренно вводится скользящий режим, обладают низкой чувствительностью к возмущениям, к изменению параметров объекта управления, возможностью создавать оптимальные траектории движений в переходных режимах и др., благодаря чему они получили распространение на многие области техники.

Цель работы – продемонстрировать эффективность применения принципов активной фильтрации с управлением на скользящих режимах при решении задачи обеспечения электромагнитной совместимости АИН с нагрузкой.

Решение задачи. Данную задачу можно рассматривать как задачу одновременного принудительного формирования координат трех объектов второго порядка, имеющих между собой электрическую связь и взаимосвязанные каналы задающих и возмущающих воздействий.

В общем виде система описывается уравнением

$$\dot{x} = f(x, t, u),$$

где x , f – векторы, размерность которых определяется количеством переменных состояния системы; u – вектор управление, каждая компонента которого претерпевает разрывы по своей поверхности, заданной уравнением $s_i(x)=0$

$$u_i(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t) & \text{при } s_i(x) > 0, \\ u_i^-(x, t) & \text{при } s_i(x) < 0, \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3).$$

В качестве поверхностей разрыва, количество которых равно размерности вектора управления, выберем

$$S_a = \eta_a + \lambda \frac{d\eta_a}{dt} = 0, \quad (1)$$

$$S_b = \eta_b + \lambda \frac{d\eta_b}{dt} = 0, \quad (2)$$

$$S_c = \eta_c + \lambda \frac{d\eta_c}{dt} = 0, \quad (3)$$

где $\eta_a = U_{ca3} - U_{ca}$ – ошибка величины напряжения на конденсаторе фильтра в фазе А;

$\eta_b = U_{cb3} - U_{cb}$ – ошибка величины напряжения на конденсаторе фильтра в фазе В;

$\eta_c = U_{cc3} - U_{cc}$ – ошибка величины напряжения на конденсаторе фильтра в фазе С;

$U_{ca3}, U_{cb3}, U_{cc3}$ – сигналы задания напряжения на нагрузке;

U_{ca}, U_{cb}, U_{cc} – сигналы обратной связи, пропорциональные напряжению на нагрузке;

λ – коэффициент, влияющий на скорость переходного процесса.

Применительно к рассматриваемой системе условие существования скользящего режима будет

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_k(x) > 0 \text{ при } S_k(x) < 0, \text{ и любом } u_j \ (j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3; j \neq k), \\ \dot{S}_k(x) < 0 \text{ при } S_k(x) > 0, \text{ и любом } u_j \ (j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3; j \neq k). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для физической реализации управления введем вектор состояния системы $u_p = (u_{p1}, u_{p2}, u_{p3})^T$, компоненты которого определяются положением изображающей точки относительно поверхности переключения

$$u_{pi} = \begin{cases} 1 & \text{при } s_i(x) > 0, \\ 0 & \text{при } s_i(x) < 0, \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3). \quad (5)$$

Каждой комбинации состояний компонент вектора u_p ставится в соответствие комбинация импульсов управления вентилями, реализующая вектор управления, который удовлетворяет условию существования скользящего режима. В рассматриваемой системе организация скользящего режима осуществима только по двум, любым из трех, поверхностям разрыва. Причем при возникновении скольжения по двум поверхностям разрыва возникает скольжение по пересечению трех поверхностей разрыва, что соответствует достижению цели управления.

Выбор поверхностей разрыва, по которым реализуется скольжение, осуществляется в пределах временных интервалов, определяемых моментами перехода через ноль сигналов задания фазных напряжений. Тогда условие существования скользящего режима (4) с учетом (5) для различных интервалов может быть представлено в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_k(x) > 0 \text{ при } S_k(x) < 0, (u_{pk} = 0) \text{ и любом } u_j (j = 1, 2, 3; j \neq k), \\ \dot{S}_k(x) < 0 \text{ при } S_k(x) > 0, (u_{pk} = 1) \text{ и любом } u_j (j = 1, 2, 3; j \neq k), \end{aligned} \right\}, (6)$$

где $k = 3, 1$ в интервалах $0 < \omega t < \pi/3, \pi < \omega t < 4\pi/3$;

$k = 1, 2$ в интервалах $\pi/3 < \omega t < 2\pi/3, 4\pi/3 < \omega t < 5\pi/3$;

$k = 2, 3$ в интервалах $2\pi/3 < \omega t < \pi, 5\pi/3 < \omega t < 2\pi$.

Функциональная схема системы (рисунок 1), реализующая

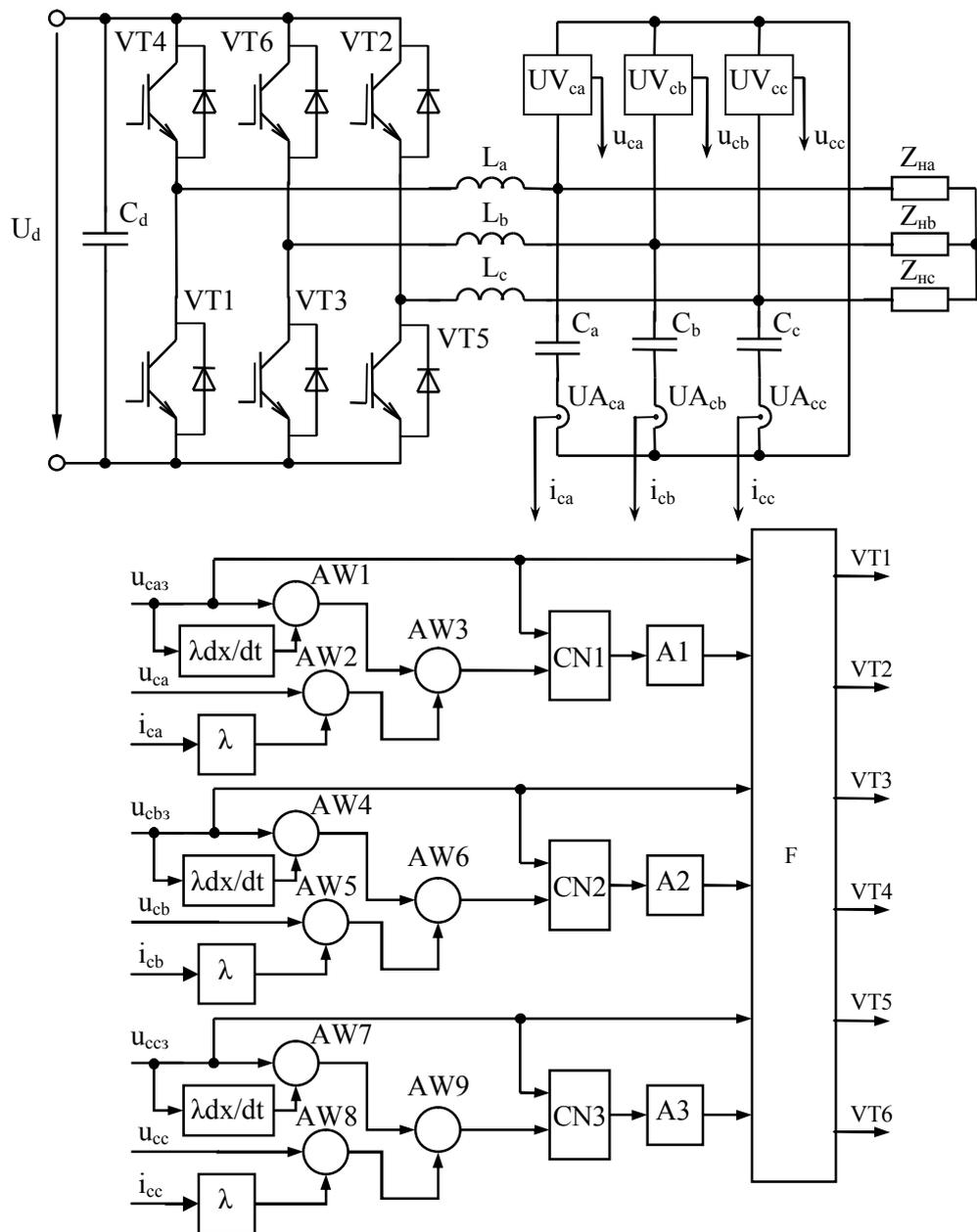


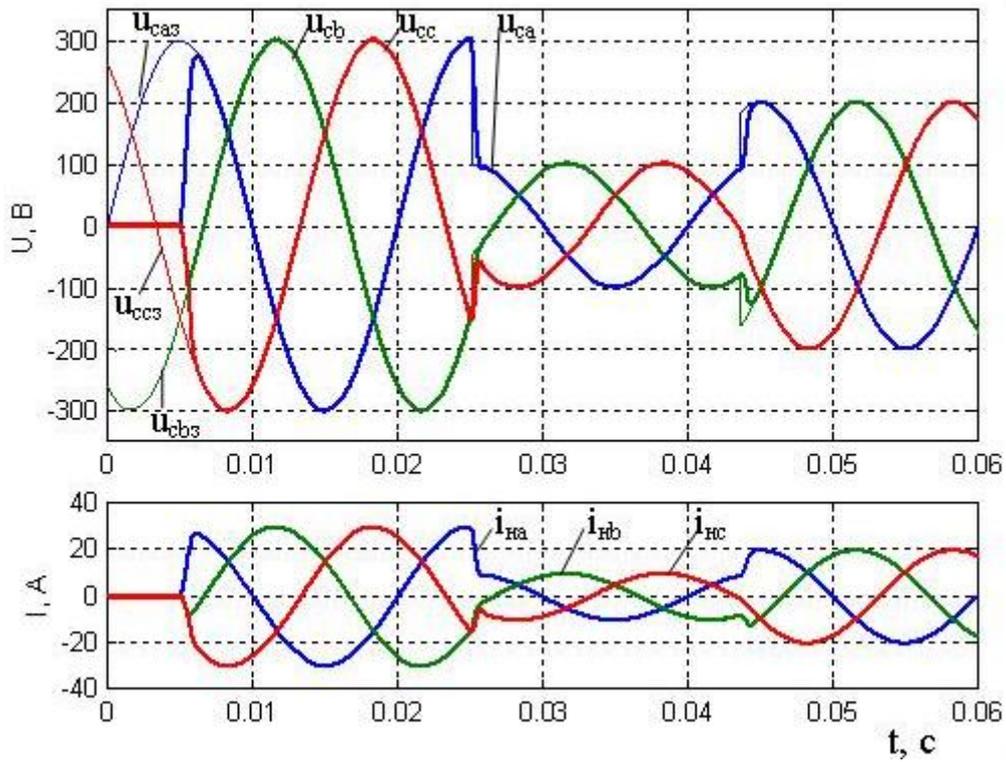
Рисунок 1 – Функциональная схема системы

управление на скользящих режимах, содержит силовой вентиляный блок, собранный на транзисторах VT1 - VT6, емкостный фильтр в цепи постоянного тока C_d , трехфазный LC фильтр, собранный на конденсаторах C_a, C_b, C_c и дросселях L_a, L_b, L_c , датчики напряжения на конденсаторах фильтра $UV_{ca}, UV_{cb}, UV_{cc}$, датчики тока через конденсаторы фильтра $UA_{ca}, UA_{cb}, UA_{cc}$, сумматоры AW1 - AW9, управляемые инверторы аналогового сигнала CN1 - CN3, релейные элементы A1 - A3, дифференциаторы dx/dt сигналов задания, усилители λ , блок логики F и трехфазную нагрузку $Z_{на}, Z_{nb}, Z_{nc}$.

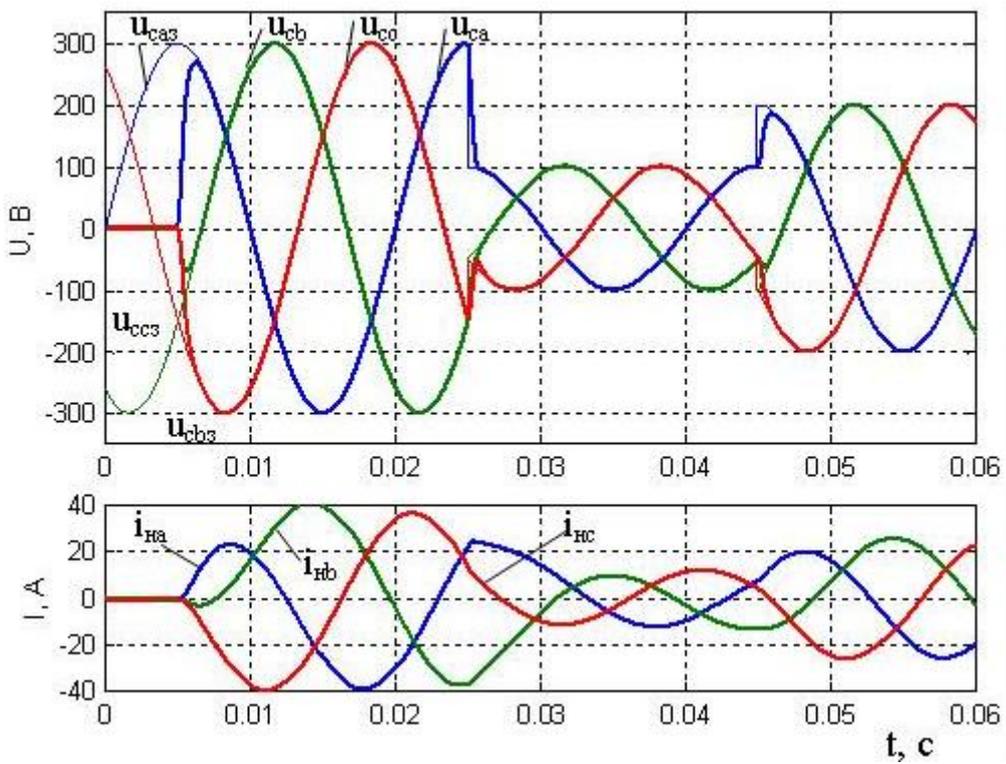
Сигналы с выходов сумматоров AW1 – AW3 пропорциональные отклонениям проекций изображающей точки от соответствующих поверхностей разрыва, задаваемых (1-3), поступают через управляемые инверторы на входы релейных элементов A1 – A3. С выходов релейных элементов вектор состояния системы u_p поступает в блок логики F, в котором, в зависимости от состояния вектора u_p и от номера интервала периода повторяемости трехфазной последовательности напряжений, вычисляется комбинация импульсов управления вентилями, реализующая физическое управление, удовлетворяющее условию существования скользящего режима (6), а значит и цели управления.

На рисунке 2 представлены диаграммы работы системы на активную (рисунок 2, а) и активно-индуктивную (рисунок 2, б) нагрузку. Параметры системы: активное сопротивление дросселя фильтра 0.1Ом, индуктивное сопротивление дросселя фильтра 5мГн, емкость конденсаторов фильтра 50мкФ, значение напряжения э.д.с. в цепи постоянного тока 600В, коэффициент наклона прямой скольжения 3, параметры задающего сигнала $U_m=300В$ частота 50Гц. Параметры нагрузки: в первом случае $R_n=10Ом$, во втором – $R_n=5Ом, L_n=20мГн$. В момент времени $t=0.005с$ происходит включение при нулевых начальных условиях. В момент времени $t=0.025с$ скачком уменьшаются амплитуды сигналов задания до значений $U_m=100В$. При $t=0.043с$ амплитуды сигналов задания увеличиваются до значений $U_m=200В$.

Из диаграмм следует, что при работе на активную и активно-индуктивную нагрузку формируемые напряжения в установившемся режиме практически совпадают с соответствующими заданиями, что подтверждает высокое качество отработки сигналов задания напряжений. Переходный процесс во всех случаях протекает без колебаний и перерегулирования. Время переходного процесса не превышает 2мс.



а) активная нагрузка



б) активно-индуктивная нагрузка

Рисунок 2 – Работа системы на различные виды нагрузок

На рисунке 3 показаны осциллограммы работы системы на R-L-E нагрузку ($R_H=50\text{ Ом}$, $L_H=20\text{ мГн}$, $e_a=E_m\sin(\omega t)$, $e_b=E_m\sin(\omega t-2\pi/3)$, $e_c=E_m\sin(\omega t+2\pi/3)$, $E_m=50\text{ В}$, $U_d=700\text{ В}$). В начальный момент времени напряжения источников э.д.с. совпадают по фазе с соответствующими сигналами задания. В момент времени $t=0.025\text{ с}$ амплитуды э.д.с. нагрузки скачком увеличиваются до значения $E_m=100\text{ В}$. В момент времени $t=0.045\text{ с}$ фаза источников э.д.с. нагрузки скачком сдвигается на 180° (напряжения источников э.д.с. в противофазе с сигналами задания). В момент времени $t=0.06\text{ с}$ напряжение питания инвертора скачком уменьшается до значения $U_d=650\text{ В}$. В момент времени $t=0.075\text{ с}$ напряжение питания инвертора скачком увеличивается до значения $U_d=750\text{ В}$. В момент времени $t=0.08\text{ с}$ амплитуды э.д.с. нагрузки скачком уменьшаются до значения $E_m=50\text{ В}$. В момент времени $t=0.09\text{ с}$ напряжение питания инвертора скачком возвращается до начального значения $U_d=700\text{ В}$.

Из диаграмм следует, что при изменении напряжения источника питания и параметров нагрузки выходные напряжения сохраняют синусоидальную форму, т.е. система нечувствительна к ограниченным по величине возмущениям со стороны нагрузки и источника питания.

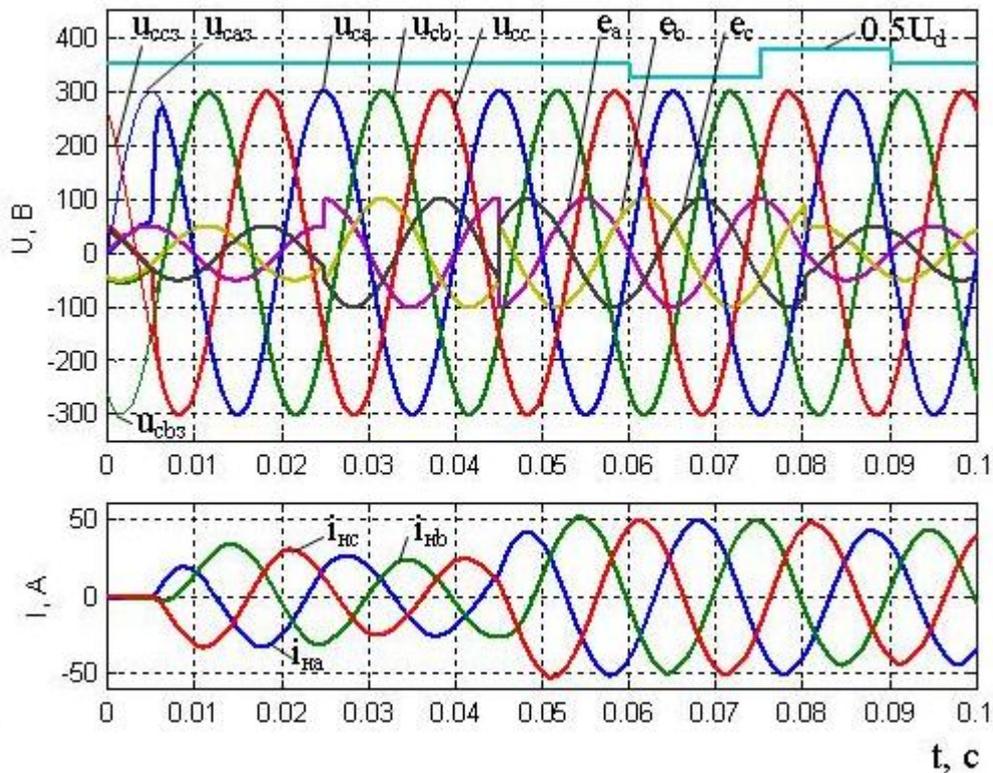


Рисунок 3 – Работа системы на R-L-E нагрузку

На рисунке 4 приведены диаграммы работы системы в режиме скачкообразного изменения задания на частоту формируемого напряжения со значениями 10Гц, 25Гц, 50Гц, 100Гц. Из диаграмм следует, что переход с одной частоты на другую происходит быстро, в установившемся режиме напряжения совпадают с соответствующими заданиями, т.е. имеют синусоидальную форму, что подтверждает способность системы формировать напряжения различной частоты с высоким качеством.

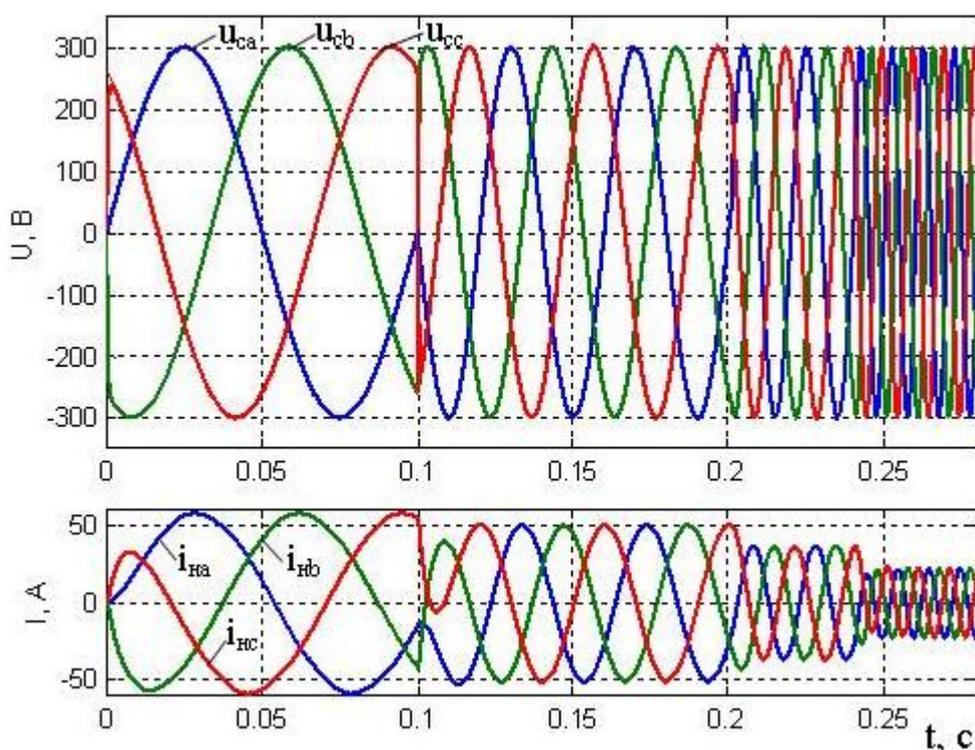


Рисунок 4 – Работа в режиме изменения задания на частоту напряжения

Выводы

Результаты компьютерного исследования показали перспективность использования скользящих режимов для управления АИН.

Использование управления на скользящих режимах АИН с фильтром второго порядка позволяет обеспечить синусоидальное напряжение на выходе с требуемой частотой и амплитудой, т.е. обеспечить высокий уровень электромагнитной совместимости преобразователя с нагрузкой. При этом переходные процессы имеют апериодический характер и достаточное для задач управления электроприводом переменного тока быстроедействие. Кроме того, использование скользящих режимов обеспечило низкую чувствительность системы к возмущениям со стороны нагрузки и источника питания.

Библиографический список

1. Рывкин С.Е. Широтно-импульсная модуляция напряжения трехфазных автономных инверторов / С.Е. Рывкин, Д.Б. Изосимов // *Электричество*. – 1997. - №6. – С. 33-39.
2. Виноградов А.Б. Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками / А.Б. Виноградов // *Электричество*. – 2003. - №6. – С. 43-51.
3. Частотно-токовый преобразователь с релейным управлением / Скурятин Ю.В., Самчелев Ю.П., Шевченко И.С., Морозов Д.И. // *Технічна електродинаміка*. – 2003. – Тем.вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.3. – С.5-8.
4. Пат. 66191 Україна, МПК (2006) H02M 5/02. Перетворювач частоти струму / Скурятин Ю.В., Самчелев Ю.П., Шевченко І.С., Морозов Д.І.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. - №2003087622; заявл. 12.08.2003; опубл. 25.05.2007, Бюл. №7.
5. Гречко Э.Н. Многоуровневые инверторы напряжения / Э.Н. Гречко, И.И. Бондаренко // *Технічна електродинаміка*. – 2001. – Тем.вип. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч.1. – С.46-49.
6. Гречко Э.Н. Многоуровневые трехфазные инверторы напряжения с поуровневой синусоидальной ШИМ / Э.Н. Гречко, Э. Кот // *Технічна електродинаміка*. – 2003. – Тем.вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2. – С.50-53.
7. Теория систем с переменной структурой / [Емельянов С.В., Уткин В.И., Таран В.А., и др.]; под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592с.
8. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / В.И. Уткин. – М.: Наука, 1974. – 272с.

Рекомендовано к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э.

