

Экспериментальное исследование транзисторного непосредственного преобразователя частоты с релейно-токовым управлением

МИКИТЧЕНКО А.Я. , БЕССОНОВ В.Г.

Экспериментально исследованы свойства транзисторного непосредственного преобразователя частоты (НПЧ), работающего в режиме источника тока, выполненного по моноблочному принципу. Это позволяет рассмотреть работу преобразователя с нагрузкой разной фазности при релейном формировании выходного тока. Тема статьи актуальна, так как в нашей стране данный тип преобразователя серийного выпуска не имеет.

Ключевые слова: транзисторный непосредственный преобразователь частоты, запас по напряжению, влияние преобразователя на сеть

Из зарубежных источников известна матричная топология преобразователя частоты (МПЧ), обладающая очень схожей и даже идентичной структурой силовой схемы с рассматриваемым ниже транзисторным НПЧ [1]. Матричные преобразователи частоты серийно стали выпускаться с 2006 г. несколькими японскими фирмами.

Прежде чем приступить к рассмотрению особенностей работы НПЧ, следует отметить ряд признаков, отличающих разработанный преобразователь от матричного ПЧ. При организации работы МПЧ необходимо составлять специальные алгоритмы для одновременного управления всеми силовыми ключами ПЧ (в самых простых схемах их 18), что усложняет системы управления, особенно при необходимости изменения режимов работы преобразователя. Как правило, для управления работой МПЧ используются широтно-импульсные методы формирования выходных параметров, а преобразователь работает как источник напряжения. При адекватном управлении МПЧ обеспечивает формирование синусоидальных токов как в сети, так и при любом характере нагрузки (например активном) с любым $\cos \varphi$.

Рассматриваемый здесь НПЧ состоит из нескольких моноблоков, представляющих собой многофазно-однофазные преобразователи с общей системой управления. Каждый моноблок, работая на свою фазу нагрузки, охвачен обратной отрицательной связью по току, заведенной на вход релейного регулятора, и обеспечивает таким образом релейное формирование тока по соответствующему заданию. Все задания формируются упомянутой

The properties of a transistor-based direct frequency converter operating in a current source mode and constructed in accordance with the single-unit principle are experimentally studied. Such approach makes it possible to consider the operation of a converter connected to a load having different number of phases and with the output current shaped in a relay manner. The importance of the considered subject is stemming from the fact that motors of this type are not serially produced in Russia.

Key words: transistor-based direct frequency converter, voltage margin, converter's effect on the network

общей системой управления (задающим генератором). При таких условиях нагрузка (например электродвигатель) обязательно должна содержать индуктивную составляющую. Простой алгоритм релейного включения и отключения ключей моноблока позволяет формировать любые по форме (например синусоидальные) токи в нагрузке с коэффициентом искажения не хуже 0,99. Потребляемые из сети токи всегда находятся в фазе с сетевыми напряжениями, т.е. $\cos \varphi = 1$.

В [2] впервые был сформулирован алгоритм управления ключами рассматриваемого ПЧ и предложена простейшая структура релейно-токового управления, обеспечивающая ему свойства источника тока. Предложенный алгоритм коммутации ключей заведомо обеспечивает потребление токов из сети в фазе с соответствующими фазными напряжениями независимо от частоты модуляции и фазности нагрузки. Преобразователь частоты способен работать как в выпрямительном режиме, так и в инверторном. При работе моноблока на однофазную нагрузку с аналоговой системой управления был достигнут диапазон формирования частот 10000:1 (от 0,01 до 100 Гц). Предполагалось, что при использовании трехфазно-однофазного варианта, а также трехфазно-двухфазного с двухфазной и трехфазной нагрузкой по мере повышения задания по току в нагрузке должны образовываться провалы в кривой формируемого тока (и выбросы в инверторном режиме), которые зависят от запаса по напряжению питания. Потребляемые токи в этих вариантах обладают несимметрией. В трехфазно-трехфазном варианте нулевой провод не нужен,

а для устранения избыточности управления один из регуляторов должен быть зависимым. Такое построение системы обеспечивает отсутствие провалов (выбросов) формируемых токов вплоть до достижения предельных значений напряжения в нагрузке, близких значениям питающего напряжения. Симметрия токов в сети и нагрузке сохраняется абсолютной независимо от частоты формируемого тока. Формы потребляемых токов и токов неуправляемого выпрямителя аналогичны, в то же время инверторный режим с изменением полярности формируемых токов существует. Однако созданная система аналогового управления и отсутствие должной элементной базы у авторов не позволили в то время реализовать необходимые экспериментальные исследования для подтверждения высказанных выше предположений. Авторы возвращаются к этому вопросу сейчас, используя новейшую элементную базу и разработанное программное обеспечение.

Следует отметить, что эксперименты проводились на макетном образце с использованием IGBT-транзисторов CM100DU-F24. Для микропроцессорной системы управления выбран микроконтроллер dsPIC30F3011-I/P, обладающий необходимым быстродействием и функциональностью. Экспериментальные данные получены с помощью регистратора аналоговых сигналов при частоте дискретизации 25 кГц. В силовой части преобразователя (как во входной, так и в выходной цепях) фильтры не применяются. Для большей наглядности снятых кривых сигналы программно отфильтрованы по усредненному значению.

Рассматривая работу НПЧ, оценим качество токов, которые можно получить в нагрузке при использовании микропроцессорной системы управления, определим запас по напряжению, необходимый для формирования синусоидальных токов, и какое влияние преобразователь оказывает на сеть.

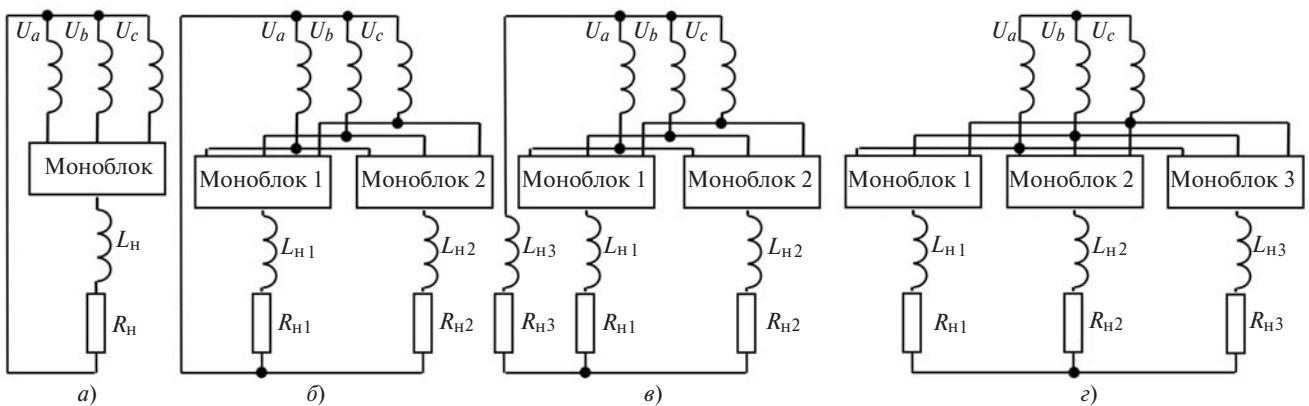


Рис. 2. Схемы транзисторного НПЧ: а – трехфазно-однофазная; б – трехфазно-двухфазная с двухфазной нагрузкой; в – трехфазно-двухфазная с двумя моноблоками; г – трехфазно-трехфазная с тремя моноблоками

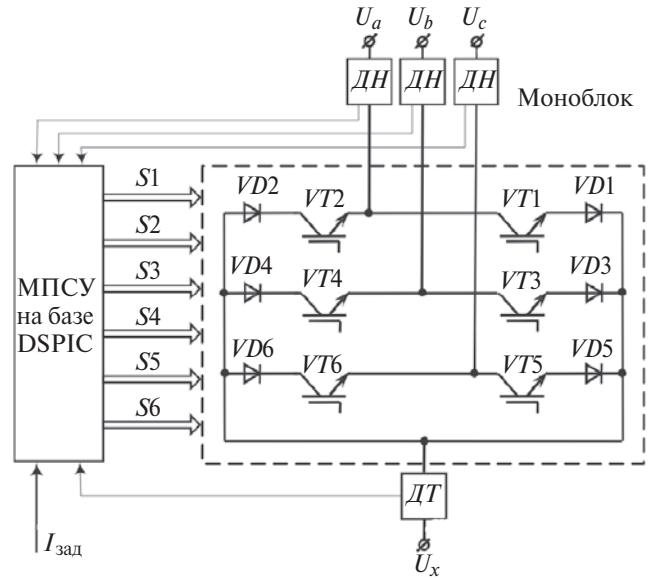


Рис. 1. Упрощенная структура моноблока транзисторного НПЧ

Упрощенная структура моноблока транзисторного НПЧ представлена на рис. 1, где обозначено: ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; МПСУ – микропроцессорная система управления; S1–S6 – каналы управления силовыми транзисторами VT1–VT6; VD1–VD6 – быстродействующие диоды, защищающие транзисторы от обратных напряжений.

Исследования свойств транзисторного НПЧ проводились при различном числе моноблоков.

Рассмотрим и проанализируем работу моноблока НПЧ при однофазной нагрузке (рис. 2).

В [2] представлены осциллограммы токов нагрузки однофазного транзисторного НПЧ ПТЭМ-2РИ при работе на активно-индуктивную нагрузку с аналоговой системой управления. Очевидным недостатком сформированных токов является «полочка» при переходе задания по току через нуль, длительность которой составила примерно 500 мкс, что весьма заметно в кривой выходного тока.

Повышение качества токов стало возможным при отказе от аналоговых принципов управления с переходом на микропроцессорное управление. Ток-вая пауза при этом составляет около 10 мкс, что обеспечивает безопасную работу преобразователя при переходе работы релейного регулятора с одной группы транзисторов ($VT1$, $VT3$ и $VT5$) на другую ($VT2$, $VT4$ и $VT6$) для формирования тока противоположной полярности. На рис. 3 представлены осциллограммы выходных фазных токов и напряжений при разном задании по частоте.

Явные провалы в кривой тока свидетельствуют о том, что уровня сетевого напряжения недостаточно для формирования тока при переходе с одной фазы сети на другую. При повышении питающего напряжения преобразователя, т.е. при обеспечении необходимого запаса по напряжению, провалы исчезают. Минимальное действующее напряжение питания преобразователя $U_{\phi 2}$, которое обеспечивает формирование синусоидального тока нагрузки I_H , можно определить по выражению [2]:

$$U_{\phi 2} \geq \sqrt{2}[(6f_m L_H + R_H)I_H + DU], \quad (1)$$

где f_m – максимальная частота модуляции; L_H , R_H – активная и индуктивная составляющие нагрузки; DU – суммарное падение напряжения на диодах и транзисторах силовой части преобразователя.

Для оценки влияния трехфазно-однофазного НПЧ на сеть были сняты осциллограммы входных токов при разных заданиях по частоте. На низких и высоких частотах (примерно 1 и 70 Гц) фазы сети загружены почти равномерно, но формы токов по фазам неодинаковы. С приближением к частоте 50 Гц ток в одной из фаз сети в течение какого-то времени может вообще отсутствовать, загруженными одинаковыми токами остаются две другие фазы, причем это состояние по фазам чередуется; чем ближе к 50 Гц, тем продолжительнее эти периоды. Наконец, если синхронизировать работу моноблока на частоте 50 Гц, то ток от одной из фаз вообще не будет потребляться. Для обеспечения равномерной загрузки силовых транзисторов через определенный интервал времени можно смещать по фазе за-

даваемый ток, т.е. изменять синхронизацию тока относительно сетевых напряжений.

При работе преобразователя на базе двух трехфазно-однофазных моноблоков с двухфазной нагрузкой (рис. 2, б) необходимо наличие общего нулевого провода, что позволяет обеспечить независимую работу релейных регуляторов, исключая их взаимное влияние друг на друга. Ток нулевого провода

$$I_0 + I_a + I_b = 0, \quad (2)$$

где I_a , I_b – токи в двухфазной нагрузке.

При использовании в качестве нагрузки двухфазной машины для обеспечения в двигателе кругового поля токи I_a и I_b должны быть сдвинуты на 90° (рис. 4).

Как и в случае с однофазной нагрузкой, при формировании токов на базе двух моноблоков также наблюдаются провалы в кривой тока по той же причине.

При работе двух моноблоков на трехфазную нагрузку (рис. 2, в) токи на выходе преобразователей должны быть сдвинуты на 120° , ток в нулевом проводе сформируется автоматически согласно (2).

Рассмотрим работу транзисторного НПЧ на базе трех моноблоков с трехфазной нагрузкой (рис. 2, г). Основное отличие этой схемы от рассмотренных состоит в отсутствии нулевого провода, что вынуждает делать работу регуляторов тока зависимой. Для обеспечения симметричной работы необходимо, чтобы два регулятора были ведущими, а один – ведомым. В кривой выходных токов преобразователя явные провалы отсутствуют, т.е. эффекта нехватки напряжения не наблюдается. Происходит это благодаря отсутствию нулевого провода. Если в одной из фаз значения ЭДС недостаточно для поддержания собственного тока, то в двух других параллельных фазах преобразователи создают между нулевыми точками трансформатора и двигателя запас напряжения, компенсирующий разницу между ЭДС в нагрузке первой фазы и ЭДС её преобразователя.

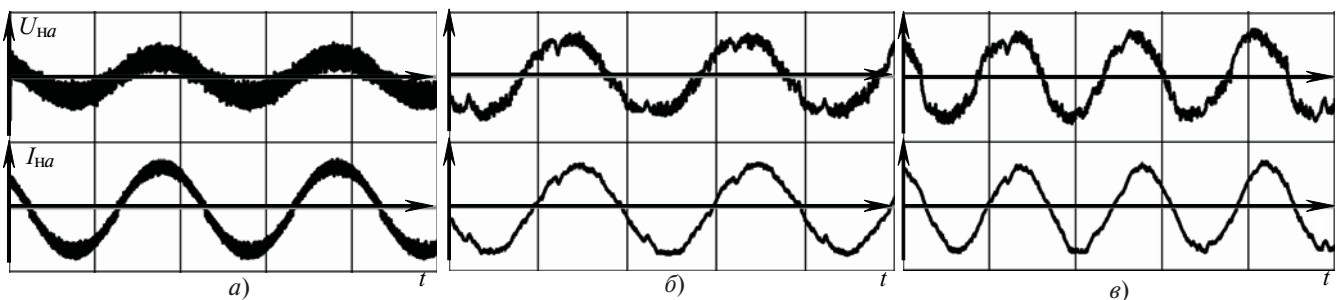


Рис. 3. Осциллограммы выходных фазных токов ($I_{Ha} - 10$ А/дел.) и напряжений ($U_{Ha} - 50$ В/дел.) трехфазно-однофазного НПЧ: а – 0,5 Гц, $t - 1$ с/дел.; б – 50 Гц, $t - 10$ мс/дел.; в – 70 Гц, $t - 10$ мс/дел.

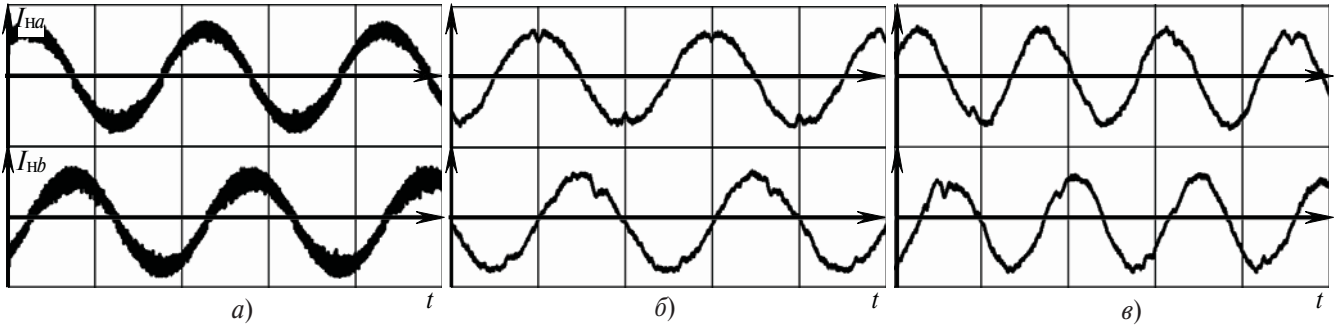


Рис. 4. Осциллограммы выходных фазных токов ($I_H = 10$ А/дел.) трехфазно-двухфазного НПЧ при задании по частоте: а – 0,5 Гц, ($t = 1$ с/дел.); б – 50 Гц, ($t = 10$ мс/дел.); в – 70 Гц ($t = 10$ мс/дел.)

Во всем рассматриваемом диапазоне частот (0,5–70 Гц) фазы сети загружены равномерно, ток сети симметричен относительно нуля, причем согласно заложенному релейному алгоритму (рис. 5).

как благодаря отсутствию нулевого провода провалы в кривой формируемого тока компенсируются моноблоками соседних фаз нагрузки.

Предложенный принцип релейно-токового управления обеспечивает синусоидальность токов в нагрузке при потреблении токов из сети с $\cos \varphi = 1$.

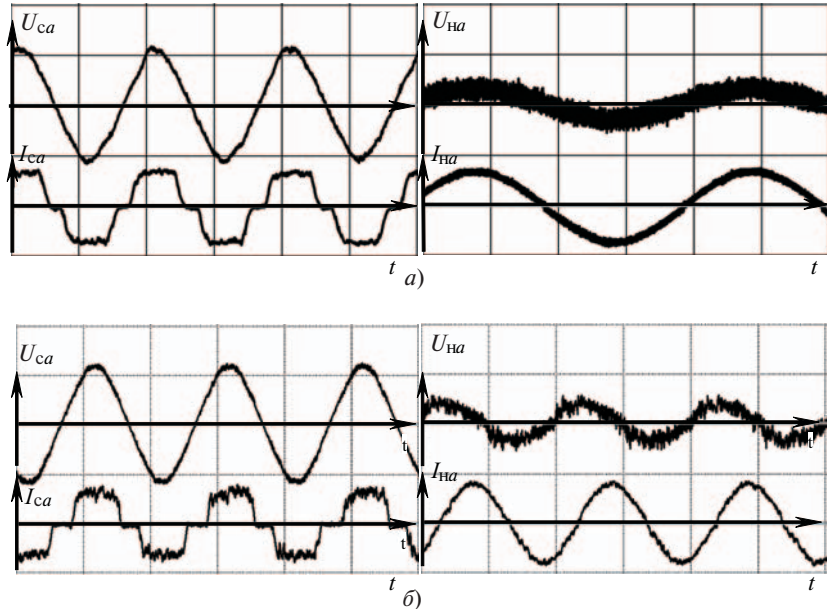


Рис. 5. Осциллограммы входных и выходных фазных токов ($I_c, I_H = 10$ А/дел.) и напряжений ($U_c, U_H = 50$ В/дел.) трехфазно-трехфазного НПЧ с тремя моноблоками при задании по частоте: а – 0,5 Гц, $t = 10$ и 0,5 мс/дел.; б – 49 Гц, $t = 10$ мс/дел

Вывод. Предположения, изложенные в [2], нашли свое подтверждение. Для того чтобы исключить провалы в кривой выходного тока при использовании трехфазно-однофазного, трехфазно-двухфазного и трехфазно-трехфазного на двух моноблоках транзисторных НПЧ, необходимо обеспечить требуемый запас по напряжению питания.

При использовании трехфазно-трехфазной схемы включения преобразователя на трех монобло-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lixiang Wei, T.A.Lipo, Ho Chan. Matrix converter topologies with reduced number of switches. – Madison: The University of Wisconsin-Madison, USA, WI 53705, 2002.
2. Микитченко А.Я. Разработка и исследование частотно-управляемого асинхронного электропривода по системе НПЧ-АД для машин предприятий горнодобывающей промышленности: Автореф. дис... докт. техн. наук. – М.: МЭИ, 1999.

[07.09.11]

Авторы: Микитченко Анатолий Яковлевич окончил в 1969 г. Фрунзенский политехнический институт. В 1999 г. в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию «Разработка и исследование частотно-управляемого асинхронного электропривода по системе НПЧ-АД для машин предприятий горнодобывающей промышленности». Директор по научной работе ОАО «Рудаавтоматика», г. Железногорск.

Бессонов Василий Григорьевич окончил в 2005 г. электроэнергетический факультет Оренбургского государственного университета (ОГУ). Преподаватель ОГУ.