

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛОРУССКОЙ ССР
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

С.Н.ПАВЛОВИЧ

На правах рукописи

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СИСТЕМЕ "ОДНОФАЗНО-ТРЕХФАЗНЫЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ -
АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ"

(Диссертация написана на русском языке)
Специальность 05-232 Электрооборудование

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск - 1971

Работа выполнена на кафедре электрооборудования и автоматизации промышленных установок Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент В.Л.Анхимюк

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Ю.А.САБИНИН
Кандидат технических наук, доцент А.М.СУТОРМИН

Ведущее предприятие - Минское Головное конструкторское бюро агрегативации в станкостроении при заводе им. Октябрьской революции.

Автореферат разослан " марта 1972 г.

Защита диссертации состоится "26 мая 1972 г.
на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: гор. Минск - 27, Ленинский проспект, 65; БПИ, Ученому секретарю Совета по энергетическим специальностям.

Дата защиты будет объявлена дополнительно в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

кандидат технических наук, доцент

(Л.Л.ЧЕРВИНСКИЙ)

Решения XXIV съезда КПСС предусматривают осуществление в широких масштабах механизации и автоматизации всех отраслей народного хозяйства. Технической основой автоматизации производственных механизмов и технологических процессов является автоматизированный электропривод. В настоящее время в области автоматизированного электропривода важной является проблема создания частотно-регулируемых приводов переменного тока с применением асинхронных двигателей, обладающих высокими эксплуатационными и энергетическими характеристиками. Решение этой проблемы связано с разработкой вентильных преобразователей частоты, в частности - преобразователей частоты с непосредственной связью (НПЧ).

Ряду специальных вопросов теории НПЧ посвящены работы П.А.Ровинского, И.Я.Бернштейна, Б.И.Фираго, Г.Е.Грабовецкого, В.Т.Загорского, Г.С.Виновьева, *C.J. Amato*, *R.J. Bland* и др.

Несмотря на большое количество публикаций, многие вопросы частотного электропривода еще недостаточно исследованы и требуют дальнейшей углубленной разработки.

Основными задачами реферируемой диссертационной работы следующие:

1. Разработка НПЧ на симисторах, предназначенного для питания асинхронного двигателя (АД) и обладающего небольшими весогабаритными показателями.
2. Исследование электромагнитных процессов в системе НПЧ - АД с учетом ЭДС вращения двигателя.
3. Гармонический анализ выходного напряжения НПЧ.
4. Исследование влияния несинусоидальности выходного напряжения НПЧ на работу АД.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. В конце каждой главы приведены выводы, следующие из содержания главы. В заключении даны общие выводы по диссертационной работе.

Первая глава посвящена разработке исследуемого НПЧ. Произведен анализ принципов построения силовых схем и систем управления НПЧ, на основании которого составлена краткая классификация НПЧ, предназначенных для регулируемого электропривода. В основу классификации положены следующие главные признаки: 1) наличие или отсутствие разделительного трансформатора; 2) число фаз на входе и выходе преобразователя; 3) вид силовой схемы (мостовая или нулевая); 4) форма кривой выходного напряжения (улучшенная или неулучшенная); 5) способ коммутации тока в вентилях;

6) наличие или отсутствие уравнивающих токов и 7) способ пропуск реактивного тока нагрузки.

Рассмотрены особенности, которые следует учитывать при построении НПЧ на симисторах.

Нами для разработки и исследования принят однофазно-трехфазный НПЧ по нулевой схеме на симисторах, с неулучшенной формой кривой выходного напряжения (прямоугольная модуляция углов открывания вентилей), с естественной коммутацией тока в вентилях, без уравнивающих токов и с пропуском реактивного тока нагрузки переводом вентилей преобразователя в инверторный режим работы. Применение однофазной питающей сети упрощает электроснабжение трехфазных потребителей, расположенных на подвижных и труднодоступных объектах, позволяет выполнить преобразователь с небольшим числом вентилей и, соответственно, с упрощенной системой управления преобразователем.

Силовая часть систем электропривода НПЧ-АД (рис.2) состоит из разделительного трансформатора Tr , симисторов $C_1 - C_6$ и АД с короткозамкнутым ротором.

Датчик прохождения тока нагрузки через нуль (ДНТ) одной фазы, блок-схема которого приведена на рис.1, работает на принципе использования в качестве информации о токе нагрузки значений напряжения на зажимах анод-катод симисторов НПЧ и построен на основе сочетания двух датчиков состояний симисторов этой фазы. Датчик состояний (открыт или закрыт) симистора представляет собой триггер Шмитта $TШ_1(TШ_2)$, вход которого через мостовой выпрямитель $B_1(B_2)$ подключен на зажимы анод-катод симистора. Когда симистор открыт, триггер Шмитта находится в одном состоянии, а когда симистор закрывается, триггер Шмитта переключается в другое состояние. Конденсаторы C_1 и C_2 на рис.1 необходимы для того, чтобы триггеры Шмитта не переключались при закрытых симисторах в моменты прохождения через нуль их анодных напряжений. Конденсатор C_3 обеспечивает задержку выходных импульсов ДНТ на время δ_0 , необходимое для восстановления запирающих свойств симисторов. Преобразователи Pr_1 и Pr_2 выполнены на магнитных мультивибраторах и служат для развязки цепей.

Рассмотренный ДНТ показал надежную и четкую работу на лабораторной установке однофазно-трехфазного НПЧ [3] и удовлетворяет всем основным предъявляемым к нему требованиям.

Формирующие устройства (ФУ) симисторов, необходимые для

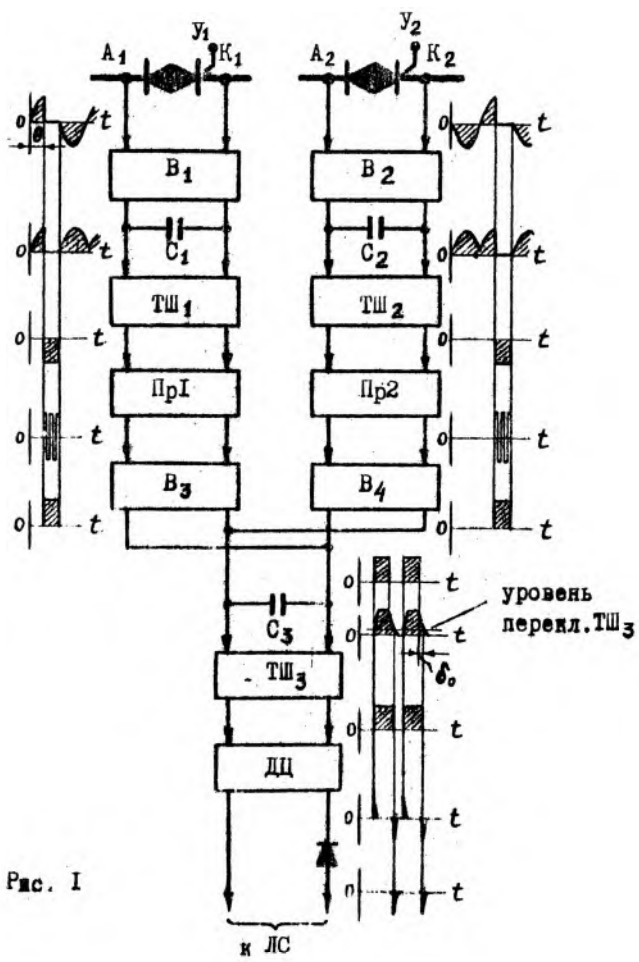


Рис. I

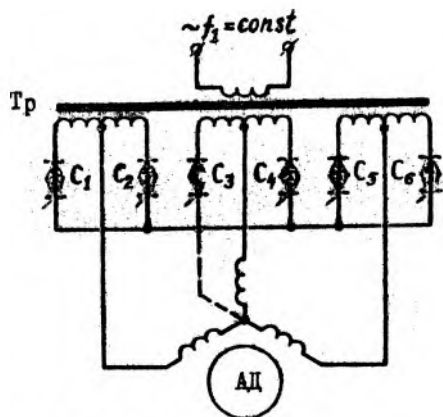


Рис. 2

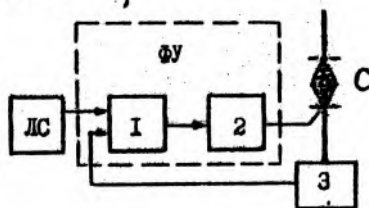


Рис. 3

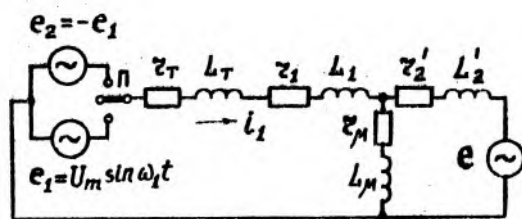


Рис. 4

вырабатывания импульсов управления определенной длительности, амплитуды и формы, предложено выполнять [6] по блок-схеме рис. 3, где блок 1 представляет собой релейный элемент, например, триггер, блок 2 - выходной усилитель, блок 3 - датчик моментов открывания симистора С. На выходе такого ФУ получаются импульсы с минимально-необходимой длительностью, определяемой временем между моментом поступления короткого импульса с логической схемы (ЛС) системы управления преобразователем и моментом, когда симистор открылся. Такие ФУ повышают надежность открывания вентилей НПЧ при переменных параметрах цепи нагрузки и при различных режимах работы системы НПЧ-АД.

Регулирование напряжения на выходе НПЧ в функции частоты осуществляется по закону с компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора АД, при этом регулирование ведется по первой гармонике напряжения. Регулятор напряжения [8] выполнен по замкнутой САР с обратными связями по току и напряжению АД.

Вторая глава посвящена анализу электромагнитных процессов в системе НПЧ-АД, где рассмотрены такие важные вопросы, как эквивалентная схема замещения системы НПЧ-АД, выходное напряжение и ток НПЧ при работе на АД в различных режимах с учетом ЭДС вращения двигателя, электромагнитный момент и колебания скорости вращения АД при питании от НПЧ. Исследования электромагнитных процессов в системе НПЧ-АД по эквивалентной схеме замещения, в которой АД представляется известной Т-образной схемой замещения при вращающемся роторе, показали, что при работе НПЧ в режиме прерывистого тока расчетные электромагнитные процессы значительно отличаются от действительных, наблюдаемых на лабораторной установке исследуемой системы электропривода. Реальные электромагнитные процессы достаточно хорошо совпадают с расчетными, если пользоваться эквивалентной схемой замещения, представленной на рис. 4, в которой вентили НПЧ заменены переключателем П, питающая сеть с разделительным трансформатором - сопротивлением Z_T , индуктивностью L_T и двумя источниками ЭДС e_1, e_2 с синусоидальными напряжениями, одинаковыми по амплитуде и противоположными по фазе, а АД представлен Т-образной схемой замещения при неподвижном роторе и источником ЭДС в цепи ротора e с напряжением, равным первой гармонике ЭДС вращения двигателя, т.е.

$$e = z_2' \frac{1-s}{s} i_2'(1) \quad (1)$$

где z_2' - приведенное активное сопротивление ротора АД; S - скольжение АД в поле первой гармоники питающего напряжения; $i_{2(n)}$ - первая гармоника приведенного тока ротора АД.

Электромагнитные процессы, происходящие в НПЧ при работе на АД, рассматриваем по участкам формирования кривых выходного напряжения и тока, используя схему замещения рис.4. На каждом участке проводимости вентилей ток i_1 , являющийся выходным током НПЧ, представляем, применяя принцип суперпозиции, в виде суммы двух составляющих

$$i_1 = i_1' + i_1'' \quad , \quad (2)$$

где i_1' - ток, протекающий через ventиль под действием ЭДС e_1 (e_2) при закороченной ЭДС e ; i_1'' - ток, протекающий через ventиль под действием ЭДС e при закороченной ЭДС e_1 (e_2).

Тогда для каждого участка проводимости вентилей будут справедливы следующие уравнения:

$$R_3' i_1' + L_3' \frac{di_1'}{dt} = U_m \sin(\omega_1 t + \theta) \quad ; \quad (3)$$

$$R_3'' i_1'' + L_3'' \frac{di_1''}{dt} = E_m \sin(\omega_2 t + \varphi_n) \quad , \quad (4)$$

где E_m, U_m - амплитудные значения ЭДС вращения АД и ЭДС вторичной полуобмотки трансформатора Тр рис.2;

θ - угол открывания вентилей; ω_1, ω_2 - угловые частоты изменения входного и выходного напряжений НПЧ; $\omega_1 = 2\pi f_1$; $\omega_2 = 2\pi f_2$; R_3', R_3'', L_3', L_3'' - эквивалентные сопротивления и индуктивности для токов i_1' и i_1'' , определяемые из схемы замещения рис.4; φ_n - начальная фаза ЭДС вращения e в момент открывания вентилей на n -ом участке; $\varphi_n = -\varphi_0 + \frac{n\pi}{\nu}$; $\nu = \frac{\omega_1}{\omega_2}$; $n = 0, 1, 2, \dots (\nu - 1)$ - номер рассматриваемого участка.

Значение E_m для заданного значения скольжения двигателя S можно определить, зная полную механическую $P_{мх}$ или электромагнитную P_3 мощности АД, по формуле:

$$E_m = \sqrt{\frac{2}{3} P_{мх} z_2' \frac{1-S}{S}} = \sqrt{\frac{2}{3} P_3 z_2' \frac{(1-S)^2}{S}} \quad (5)$$

Угол φ_0 представляет собой угол сдвига тока $i_{2(1)}$ относительно начала координат (рис.5) и приблизительно может быть определен по данным схемы замещения рис.4.

Подставляя в (2) решения уравнений (3) и (4) относительно токов i_1' и i_1'' , получим:

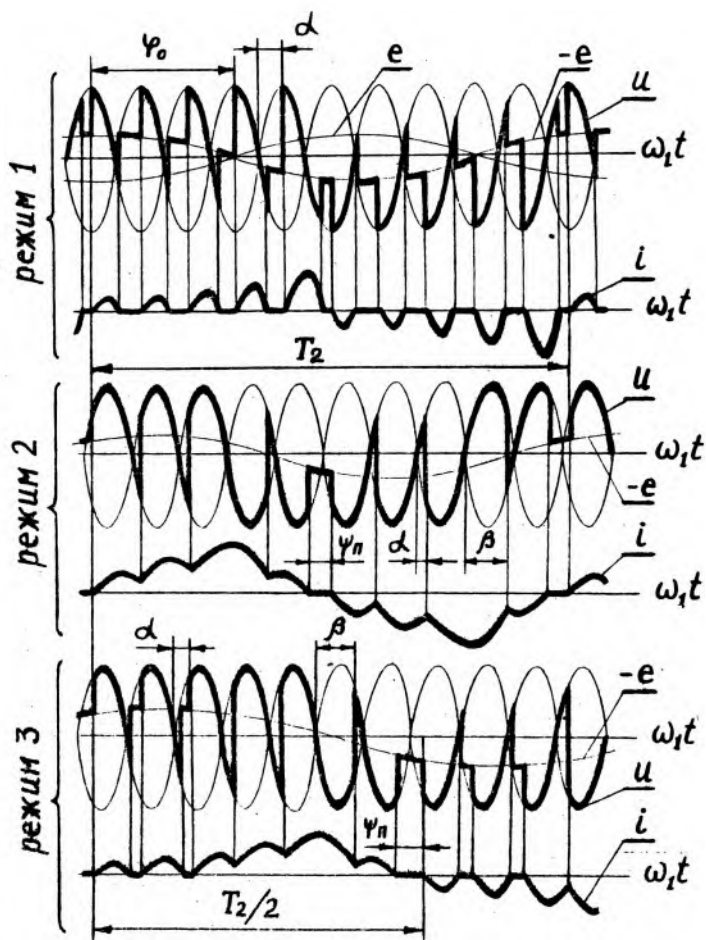


Рис. 5. Выходное напряжение (u) и ток (i) НПЧ при работе на вращающийся АД: режим 1 - прерывистый ток; режим 2 - непрерывный ток; режим 3 - прерывисто-непрерывный ток.

$$i_1 = I_m \sin(\omega_1 t + \theta - \psi) + [i_1'(0) - I_m \sin(\theta - \psi)] e^{-\omega_1 t \operatorname{ctg} \psi} + \\ + I_m' \sin(\omega_2 t + \varphi_n - \psi') + [i_1''(0) - I_m' \sin(\varphi_n - \psi')] e^{-\omega_2 t \operatorname{ctg} \psi'} \quad (6)$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{Z}; \quad Z = \sqrt{(R_3')^2 + (\omega_1 L_3')^2}; \quad \psi = \operatorname{arctg} \frac{\omega_1 L_3'}{R_3'};$$

$$I_m' = \frac{E_m}{Z'}; \quad Z' = \sqrt{(R_3'')^2 + (\omega_2 L_3'')^2}; \quad \psi' = \operatorname{arctg} \frac{\omega_2 L_3''}{R_3''};$$

$i_1'(0), i_1''(0)$ - значения токов i_1' и i_1'' к моменту открывания вентилей, которые численно равны значениям этих токов в конце предыдущего участка.

Анализ выходного тока НПЧ на каждом участке n в течение полупериода по выражению (6) показывает, что при работе НПЧ на вращающийся АД, по сравнению с RL нагрузкой, кроме режимов прерывистого и непрерывного тока возможен еще и третий режим, который мы назвали режимом прерывисто-непрерывного тока. В этом режиме (рис.5, режим 3) в течение каждого полупериода имеется зона прерывистого и зона непрерывного тока.

Анализ электромагнитного момента АД при питании от НПЧ проведен с использованием метода результирующих пространственных векторов. При этом получены аналитические выражения для составляющих векторов напряжения и тока статора АД по осям α и β неподвижной относительно статора двигателя прямоугольной системы координат, а также приближенные упрощенные выражения для потокоцеплений фаз двигателя. Расчетные данные для годографов результирующих векторов напряжения, тока и потокоцепления АД и электромагнитного момента достаточно хорошо подтверждаются результатами физико-математического моделирования на АВМ типа МН-7. На модель подавались реальные формы фазных напряжений и токов АД при питании от НПЧ.

Анализ электромагнитных процессов в системе НПЧ-АД показывает, что ЭДС вращения двигателя оказывает существенное влияние на характер их протекания во времени: а) в режиме прерывистого тока длительность и амплитуда импульсов тока переменные в течение полупериода выходной частоты НПЧ, хотя углы открывания вентилей $\theta = \operatorname{const}$; б) НПЧ может работать (рис.5) в трех режимах: 1) прерывистого, 2) непрерывного и 3) прерывисто-непрерывного тока; в) в кривой выходного напряжения НПЧ в бестоковые интервалы времени присутствуют участки ЭДС вращения двигателя; г) электро-

магнитный момент АД в режиме прерывистого тока имеет импульсный характер с непостоянной амплитудой импульса, принимая даже отрицательные значения.

Как фазовая, так и амплитудная асимметрия выходных напряжений НПЧ приводит к еще большему изменению амплитуд импульсов электромагнитного момента и, соответственно, к увеличению колебаний скорости вращения АД.

Исследования колебаний скорости вращения АД при питании от НПЧ, обусловленных пульсациями электромагнитного момента, проведено экспериментальным путем с помощью импульсного датчика скорости (кодирующий диск дает 120 импульсов за один оборот). Для этого были сняты на пленку (осциллограф типа МПО2) ряд осциллограмм при различных режимах работы системы НПЧ-АД и различных частотах питающего двигателя напряжения. В качестве исследуемого двигателя использовался АД мощностью 1 кВт 1410 об/мин с дополнительным маховым моментом на валу $GD_{\text{мах}}^2 = 4GD^2$ ротора АД. Результаты обработки осциллограмм и анализа полученных данных показывают, что:

а) наиболее выражены пульсации мгновенной скорости вращения АД с шестикратной частотой по отношению к частоте первой гармоники питающего двигателя напряжения; б) с уменьшением частоты питающего напряжения амплитуда пульсаций, определяемая по выражению

$$\Delta\omega^* = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{2\omega_{\text{cp}}} \quad , \quad (7)$$

где ω_{max} , ω_{min} , ω_{cp} - максимальная, минимальная и средняя скорости вращения АД на протяжении периода (или полупериода) питающего напряжения, увеличивается (при $f_2 = 10$ Гц $\Delta\omega^* = 0,03$, при $f_2 = 2,2$ Гц $\Delta\omega^* = 0,06$, а при $f_2 = 0,8$ Гц $\Delta\omega^* = 0,35$); в) амплитуда пульсаций при холостом ходе АД несколько больше, чем при нагрузке (при холостом ходе для $f_2 = 10$ Гц $\Delta\omega^* = 0,03$, а при номинальной нагрузке $\Delta\omega^* = 0,025$); г) в режиме непрерывного тока амплитуда пульсаций скорости вращения немного меньше, чем в режиме прерывистого тока ($\Delta\omega^* = 0,35$ для $f_2 = 0,8$ Гц в режиме прерывистого тока и $\Delta\omega^* = 0,3$ в режиме непрерывного тока).

В главе III проведен гармонический анализ выходного напряжения НПЧ при работе на трехфазную RL нагрузку, параметры R и L которой по величине равны эквивалентным параметрам R'_3 и L'_3 , при следующих допущениях: 1) нагрузка симметрична по фазам; 2) вентили идеальные; 3) коммутация тока в вентилях мгновенная; 4) полупериод выходного напряжения НПЧ состоит из целого числа полу-

периодов питающего преобразователь напряжения. Рассмотрен гармонический состав выходного напряжения НПЧ при соединении нагрузки по схемам "звезда с нулевым проводом" (\star) и "звезда без нулевого провода" (\wedge) в режимах прерывистого и непрерывного тока. Получены аналитические выражения для коэффициентов ряда Фурье, согласно которых составлена программа и с помощью ЦВМ "Минск-22" вычислены эти коэффициенты для различных значений углов θ и соотношений частот γ .

Анализ результатов разложения в ряд Фурье кривых выходного напряжения НПЧ показывает, что: 1) с увеличением θ первая гармоника напряжения уменьшается, а процентное содержание высших гармоник увеличивается; 2) при увеличении γ первая гармоника напряжения тоже уменьшается, но очень мало и при $\gamma > 9$ остается почти постоянной; 3) наибольшую амплитуду, превышающую иногда в 3-4 раза амплитуду первой гармоники, имеют гармонические порядки $K = 2\gamma \pm 1$; 4) при соединении нагрузки по схеме \wedge в выходном напряжении НПЧ отсутствуют гармоники, кратные трем, а остальные гармоники по амплитуде такие же, как в схеме \star ; 5) в режиме непрерывного тока гармонический состав заметно лучше, чем в режиме прерывистого тока.

Расчетный гармонический анализ хорошо согласуется с опытным анализом, проведенным по методу измерения активной мощности несинусоидального тока с помощью электродинамического ваттметра.

Рассмотрен вопрос об основных величинах, характеризующих выходное напряжение НПЧ. Получены аналитические зависимости среднего и действующего значений выходного напряжения НПЧ в режимах прерывистого и непрерывного тока для схем \star и \wedge . Из полученных соотношений следует, что средние и действующие значения выходного напряжения НПЧ как в режиме прерывистого, так и непрерывного тока для схем соединения нагрузки \star и \wedge связаны соотношениями:

$$U_{ср\wedge} = \frac{8}{9} U_{ср\star} ; \quad U_{\wedge} = \frac{\sqrt{8}}{3} U_{\star} \quad (8)$$

Эта разница средних и действующих значений напряжения для схем \wedge и \star объясняется наличием в схеме \star , а в схеме \wedge отсутствием гармоник кратных трем, при остальных гармониках, одинаковых по амплитуде для обеих схем.

Результаты расчета зависимостей $\frac{U_{ср}}{U_m}$, $\frac{U}{U_m}$, коэффициента формы $K_{ф} = U/U_{ср}$, коэффициента нелинейного искажения первой гармо-

ники напряжения $K_u = U_{(n)}/U$, коэффициента гармоник $K_r = \sqrt{\sum_{k=2,3,5,\dots}^{\infty} U_{(k)}^2} / U_{(1)}$ при изменении θ и γ представлены в виде графиков на рис. 6. Лучшие характеристики получаются при соединении нагрузки по схеме Δ . Коэффициент формы при соединении нагрузки по схеме Δ в $3/\sqrt{8}$ раз выше, чем в схеме \star .

В четвертой главе исследовано влияние высших гармоник питающего напряжения на рабочие и механические характеристики АД, проанализированы тормозные режимы работы АД при питании от НПЧ и сделано сравнение однофазно-трехфазных и трехфазно-трехфазных НПЧ на симисторах и тиристорах по технико-экономическим показателям.

Исследование влияния высших гармоник напряжения на характеристики двигателя проведено по методу гармонических двигателей, используя данные гармонического анализа гл. III. Основные соотношения для расчета получены на основании схем замещения АД для каждой гармоники, причем как для первой, так и для высших - с учетом намагничивающего контура. Исследование проведено при управлении напряжением по закону с постоянством потока для двигателя мощностью 1 кВт. Результаты расчета токов статора, ротора и намагничивающего контура, потерь в меди и стали, действующего значения напряжения на зажимах статора, коэффициента мощности и электромагнитного КПД двигателя, взятые по отношению к соответствующим величинам от действия первой гармоники питающего напряжения, представлены в виде таблиц и графиков. На рис. 7 приведены зависимости электромагнитного КПД η_{Σ}^* , а в таблице I - значения коэффициента мощности K_M^* в функции $\gamma = f_2/f_n$ при различных углах θ и $\beta = S_n$, где $\beta = f/f_n$ - параметр абсолютного скольжения АД, f - частота тока в роторе, f_n - номинальная частота тока в статоре, f_2 - частота первой гармоники питающего напряжения, S_n - номинальное скольжение АД. Для различных γ и θ были сняты также экспериментальные характеристики АД при питании его от НПЧ и от машинного преобразователя частоты с синусоидальным выходным напряжением. Погрешность между расчетными и опытными данными составляет до 15%. Причем, опытные данные для КПД и коэффициента мощности выше расчетных. Это можно объяснить в основном тем, что выходное напряжение НПЧ имеет лучший гармонический состав при работе на вращающийся АД, чем при работе на RL нагрузку.

Для АД, работающего от исследуемого НПЧ, можно осуществить все три вида электрического торможения: 1) генераторное, 2) пассивным включением и 3) динамическое. Достаточно легко и сравнительно

Таблица I

γ	схема соединения АД	θ					
		непрерывный ток			прерывистый ток		
		0°	30°	60°	75°	90°	120°
$\frac{I}{3}$	\star	0,845	0,780	0,547	0,463	0,365	0,167
	\wedge	0,880	0,805	0,553	0,467	0,370	0,170
$\frac{I}{6}$	\star	0,873	0,794	0,578	0,525	0,488	0,404
	\wedge	0,891	0,815	0,590	0,529	0,500	0,408
$\frac{I}{9}$	\star	0,880	0,810	0,595	0,528	0,482	0,424
	\wedge	0,905	0,825	0,604	0,539	0,493	0,434

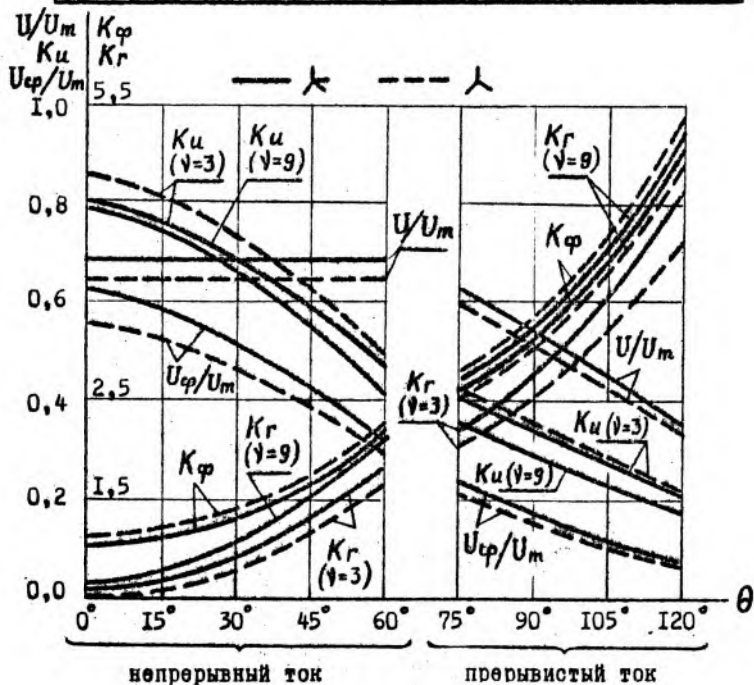


Рис. 6

простыми средствами осуществляется динамическое торможение с возможностью управления интенсивностью торможения.

Технико-экономическое сравнение НПЧ показывает, что низко-частотные НПЧ на симисторах в отличие от НПЧ на тиристорах обладают вдвое меньшей установленной мощностью вентилей при одинаковой степени их использования по напряжению.

В приложении приведены программы расчета гармонического состава выходного напряжения НПЧ в режимах прерывистого и непрерывного тока для схем соединения нагрузки \star и \wedge .

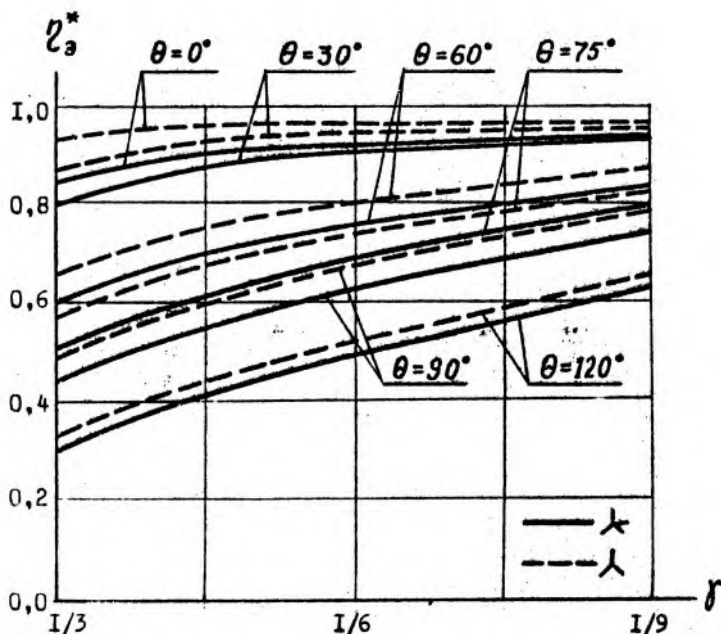


Рис. 7

Общие выводы по результатам исследований

Основные результаты теоретического и экспериментального исследования частотно-регулируемого электропривода с асинхронным двигателем при питании от однофазно-трехфазного НПЧ заключаются в следующем:

1. Произведена классификация НПЧ, предназначенных для регулируемого электропривода, в основу которой положены главные принципы построения силовых схем и систем управления НПЧ.

2. Разработан однофазно-трехфазный НПЧ на симисторах без уравнивательных токов, в котором:

а) датчики контроля прохождения тока нагрузки через нуль построены на принципе использования в качестве информации о токе нагрузки значений напряжения на зажимах анод-катод симисторов НПЧ;

б) формирующие устройства симисторов вырабатывают управляющие импульсы с минимально-необходимой длительностью, достаточной для надежного открывания вентилей при различных режимах работы системы НПЧ-АД;

в) регулятор выходного напряжения выполнен по замкнутой САР с обратными связями по току и напряжению двигателя и осуществляет регулирование первой гармоники напряжения в функции частоты по закону с компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора АД.

3. Разработана методика исследования и рассмотрены электромагнитные процессы в системе НПЧ-АД с учетом ЭДС вращения двигателя.

4. Получены аналитические выражения для выходного тока и напряжения НПЧ с учетом ЭДС вращения двигателя. При этом установлено, что ЭДС вращения оказывает существенное влияние на характер и величину выходного тока, напряжения НПЧ и на электромагнитный момент двигателя.

5. Выявлено, что при питании АД от НПЧ наиболее выражены колебания скорости вращения двигателя, обусловленные пульсациями электромагнитного момента, с шестикратной частотой по отношению к частоте первой гармоники питающего напряжения.

6. Проведено аналитическое исследование гармонического состава кривой выходного напряжения НПЧ для различных значений θ , γ , режимов работы и схем соединения нагрузки \star и \wedge . С помощью ЦВМ "Минск-22" выполнен количественный расчет коэффициентов гармонического ряда. Результаты расчета на ЦВМ хорошо согласуются

с данными экспериментального гармонического анализа выходного напряжения НПЧ, проведенного по методу измерения активной мощности несинусоидального тока с помощью электродинамического ваттметра.

7. Проведен теоретический анализ основных показателей, характеризующих выходное напряжение НПЧ (среднее и действующее значения напряжения, коэффициенты формы, искажения и гармоник).

8. Теоретические и экспериментальные исследования влияния несинусоидальности выходного напряжения НПЧ на работу АД показывают, что:

а) режим непрерывного тока с энергетической точки зрения целесообразнее режима прерывистого тока;

б) высшие гармонические питающего напряжения практически не оказывают влияния на механические характеристики двигателя, если регулирование напряжения ведется по первой гармонике;

в) высшие гармоники напряжения сказываются в основном на увеличении действующих значений напряжения, токов статора и ротора, потерь в меди и на уменьшении коэффициента мощности и КПД двигателя.

9. Данные теоретического анализа рассматриваемых в работе вопросов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке исследуемой системы электропривода и при моделировании на АВМ типа МН-7.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке и исследовании тиристорных частотно-регулируемых электроприводов.

Основные результаты работы доложены и обсуждены:

1. На II научно-технической конференции по проблеме тиристорно-управляемого асинхронного электропривода, г.Свердловск, 1971 г.

2. На I межвузовской конференции по электронике, г.Томск, 1969 г.

3. На XXV, XXVI, XXVII научно-технических конференциях Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности, г.Минск, 1969, 1970, 1971 гг.

4. На II Республиканском семинаре "Применение полупроводниковых приборов в автоматизированном электроприводе", г.Минск, 1971 г.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Система управления преобразователем частоты без звена

постоянного тока на симисторах. Материалы к XXV научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности. Минск, 1969 (соавтор Фираго Б.И.).

2. Полупроводниковые системы управления преобразователями частоты с непосредственной связью на симисторах (НПЧС). Тезисы докладов I конференции по электронике. Томск, 1969 (соавторы Фираго Б.И., Готовский Б.С.).

3. Преобразователь частоты с непосредственной связью на симисторах без уравнивающих токов. "Известия ВУЗов СССР - Энергетика", 1970, №8 (соавтор Фираго Б.И.).

4. Реализация законов частотного управления асинхронного двигателя, работающего от тиристорного преобразователя частоты. Материалы к XXVI научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности. Минск, 1970 (соавтор Фираго Б.И.).

5. Характеристики асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты. "Промышленность Белоруссии", 1971, №8.

6. Формирующее устройство тиристора. Листок технической информации № ОI/53-1971, БелНИИЭТИ, Минск (соавтор Фираго Б.И.).

7. Работа преобразователя частоты с непосредственной связью на асинхронный двигатель. Асинхронный тиристорный электропривод. Свердловск, 1971 (соавторы Фираго Б.И., Готовский Б.С.).

8. Регулирование напряжения асинхронного двигателя, работающего от преобразователя частоты. "Известия ВУЗов СССР - Энергетика", 1971, №9 (соавтор Фираго Б.И.).