

УДК 621.313.2.072.2

## **Исследование мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем при 180-градусном управлении<sup>1</sup>**

**А.Б. Кондратьев, А.В. Кривилев, А.В. Ситникова**

Проведено исследование работы мехатронного модуля с трёхфазным вентильным двигателем и фазами, соединёнными по схеме «звезда», при различных методах 180-градусной коммутации ключевыми элементами, в ходе которого: получены аналитические выражения рассматриваемых методов; разработана компьютерная модель мехатронного модуля; реализованы на языке MATLAB модули, позволяющие автоматизировать моделирование и представление результатов в необходимом для анализа виде; на языке VHDL описаны методы коммутации и осуществлено программирование цифровой системы управления мехатронного модуля в программируемую логическую интегральную схему; выполнены экспериментальные исследования лабораторного макета мехатронного модуля и проанализированы полученные данные экспериментальных исследований и результатов компьютерного моделирования на предмет адекватности модели и реального устройства; построены механические, регулировочные и энергетические характеристики. В результате проведённого исследования определён метод коммутации, при котором механические характеристики присутствуют во всех квадрантах, регулировочные характеристики линейные, а теряемая мощность в обмотке минимальная, что даёт право рекомендовать его в качестве одного из основных методов при проектировании приводных систем.

Ключевые слова: энергосберегающий алгоритм; исследование, цифровой электропривод; импульсное управление; методы коммутации; трёхфазный вентильный двигатель;

---

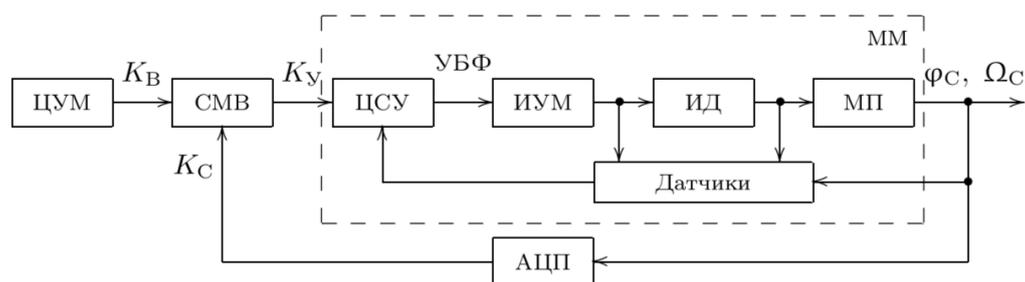
<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы

компьютерное моделирование; программный комплекс; цифровые сигналы, напряжения; статические характеристики; энергетические характеристики.

## Введение

В настоящее время около 70% всей вырабатываемой в мире электроэнергии потребляется электрическими двигателями. Следовательно, разработка как новых типов двигателей, так и совершенствование существующих, наряду с получением высокоэффективных алгоритмов их управления, позволяющих повысить КПД, снизить массовые и габаритные показатели, увеличить время работы в автономном режиме устройства и срок службы являются актуальными задачами.

Электрические двигатели применяются в исполнительных устройствах электроприводов. Современный цифровой следящий электропривод, приведённый на рис. 1, включает в себя цифровую управляющую машину (ЦУМ), специализированный микропроцессорный вычислитель (СМВ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и мехатронный модуль (ММ), который состоит из цифровой системы управления (ЦСУ), вентильного двигателя (ВД), содержащего импульсный усилитель мощности (ИУМ) и синхронный двигатель (СД), механической передачи (МП) и датчиков обратной связи.



**Рис. 1.** Цифровой следящий привод с мехатронным модулем

Создание быстродействующих и энергосберегающих алгоритмов цифрового управления электрическими приводами связано с исследованиями процессов, протекающих в его силовой (энергетической) части в зависимости от выбранного метода управления, и выработки соответствующих рекомендаций. В работе [1] наряду с предложенной методикой определения дополнительных потерь мощности представлены исследования процессов,

происходящих в мехатронном модуле на основе трёхфазного двигателя с фазами, соединёнными по схеме «треугольник», и их влияния на механические и энергетические характеристики. Данная работа посвящена исследованиям процессов, которые имеют место в мехатронном модуле привода на основе трёхфазного вентильного двигателя с фазами, соединёнными по схеме «звезда», при различных методах 180-градусной коммутации.

Получение данных и анализ процессов в сложных технических системах, одной из которых является мехатронный модуль, могут быть выполнены посредством компьютерного моделирования. Автоматизация и ускорение проводимых исследований связаны с созданием модулей, выполняющих параллельный запуск нескольких экземпляров компьютерной модели с различными входными данными на отдельных ядрах одного или нескольких процессоров, а также сбор и представление результатов моделирования в удобном для анализа виде.

Одним из этапов проводимых исследований является этап создания макетного образца мехатронного модуля, проведения экспериментальных исследований его работы и сравнения полученных в соответствующих условиях модельных и экспериментальных данных на предмет достоверности разработанной компьютерной модели. При хорошем (с точностью до 10%) совпадении результатов моделирования и экспериментальных данных на базе компьютерной модели определяются механические, регулировочные и энергетические характеристики, с помощью которых можно сделать вывод об эффективности рассматриваемого метода и степени влияния на них частоты широтно-импульсного сигнала (ШИС).

Таким образом, задачами исследования являются: создание компьютерной модели мехатронного модуля, позволяющей реализовать произвольный метод 180-градусной коммутации; разработка описания функционирования ЦСУ на одном из языков описания цифровых устройств; проведение моделирования компьютерной модели и экспериментальных исследований макетного образца ММ с последующим сравнением результатов; построение статических и энергетических характеристик; определение наиболее эффективного с точки зрения минимальных потерь мощности и линейности статических характеристик метода коммутации и выработки рекомендаций по его использованию.

### **Математическое описание методов коммутации**

Разработка компьютерной модели ММ сопряжена с получением математического

описания входящих в него элементов (блоков). При формировании математического описания ЦСУ необходимо получить аналитические выражения УБФ для рассматриваемого метода коммутации [2]. Согласно [3] существуют восемь различных методов коммутации КЭ: С - симметричная, Д - диагональная, Н - несимметричная, П - поочерёдная, НД - несимметрично-диагональная, ПД - поочерёдно-диагональная, СН - симметрично-несимметричная и СП - симметрично-поочерёдная. Методы СН, Н и НД имеют по два варианта реализации: в первом варианте при нулевом значении ШИС во включённом состоянии находятся соответствующие верхние КЭ, а во втором варианте - нижние КЭ. Методы СП, П и ПД включают оба варианта методов НП, Н и НД соответственно. Применительно к трёхфазному двигателю со 180-градусным управлением следует использовать более точные сокращения: 180Д (180Д<sub>П</sub>) - метод 180-градусной диагональной коммутации (с учётом паузы при переключении КЭ). По умолчанию считается, что сигналы о положении ротора сдвинуты друг относительно друга на угол 120 градусов. В случае 60-градусного сдвига сокращения будут следующими:  ${}_{60}180Д$  ( ${}_{60}180Д_{П}$ ).

В математическом описании методов коммутации, которое было получено с помощью автоматизированных подходов, предложенных в [3, 4], используются следующие обозначения: *DR* - сигнал (логическая переменная) направления вращения (DiRection); *SP* - широтно-импульсный сигнал, скважность которого пропорциональна желаемой скорости вращения ротора двигателя (Speed); *PR* - сигнал равномерной загрузки КЭ по току (PRoportional); *H1*, *H2* и *H3* - сигналы (ДПП); *DT<sub>DR</sub>*, *DT<sub>SP</sub>*, *DT<sub>H</sub>* - сигнал паузы (Dead Time) при переключении КЭ, активность которого связана с изменением значения логической переменной *DR* (*SP*, *H<sub>i</sub>*). Так как выражения для второй и третьей стоек (*U3*, *U4*, *U5* и *U6*) отличаются от выражения для первой стойки (*U1* и *U2*) только наборами сигналов о положении ротора, то полное описание дано для одного метода, а для всех остальных приведено описание УБФ, поступающих только на первую стойку.

Аналитические выражения метода 180Д:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= DR \overline{H_1} H_2 SP \vee DR H_2 \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} H_1 \overline{H_2} SP \vee \overline{DR} H_2 H_3 SP; \\
 U_2 &= DR H_1 \overline{H_2} SP \vee DR \overline{H_2} H_3 SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} H_2 SP \vee \overline{DR} H_2 \overline{H_3} SP; \\
 U_3 &= DR \overline{H_1} H_3 SP \vee DR \overline{H_2} H_3 SP \vee \overline{DR} H_1 \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} H_2 \overline{H_3} SP; \\
 U_4 &= DR H_1 \overline{H_3} SP \vee DR H_2 \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} H_3 SP \vee \overline{DR} \overline{H_2} H_3 SP; \\
 U_5 &= DR H_1 \overline{H_2} SP \vee DR H_1 \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} H_2 SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} H_3 SP; \\
 U_6 &= DR \overline{H_1} H_2 SP \vee DR \overline{H_1} H_3 SP \vee \overline{DR} H_1 \overline{H_2} SP \vee \overline{DR} H_1 \overline{H_3} SP.
 \end{aligned} \tag{1}$$



$$\begin{aligned}
U_1 &= DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{H_1} H_2 SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} H_2 \overline{H_3} SP \vee \\
&\vee DR \overline{H_1} H_2 PR \overline{SP} \vee DR H_2 \overline{H_3} PR \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee \\
&\vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_2} PR \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{H_2} \overline{H_3} PR \overline{SP}; \\
U_2 &= DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \\
&\vee DR \overline{H_1} \overline{H_2} \overline{PR} \overline{SP} \vee DR \overline{H_2} \overline{H_3} \overline{PR} \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee \\
&\vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_2} \overline{PR} \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{H_2} \overline{H_3} \overline{PR} \overline{SP}.
\end{aligned} \tag{5}$$

В случае  $DT_{DR} = DT_H = 0$  выражения (5) описывают метод 180ПД. При  $PR = 1$  аналитические выражения соответствует методу  $\overline{180НД_{П}}$  ( $\overline{180НД}$ ), а при  $PR = 0$  - методу  $\underline{180НД_{П}}$  ( $\underline{180НД}$ )

Выражения для метода 180СПП:

$$\begin{aligned}
U_1 &= DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} H_2 SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} H_2 \overline{H_3} SP \vee \\
&\vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} \overline{H_2} PR \overline{SP} \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_2} \overline{H_3} PR \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee \\
&\vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} H_2 PR \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_2} \overline{H_3} PR \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_2} \overline{H_3} SP; \\
U_2 &= DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \\
&\vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} H_2 \overline{PR} \overline{SP} \vee DR \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_2} \overline{H_3} \overline{PR} \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_H} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} H_2 SP \vee \\
&\vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_1} \overline{H_2} PR \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \overline{H_2} \overline{H_3} \overline{PR} \overline{SP}.
\end{aligned} \tag{6}$$

В случае  $DT_{DR} = DT_H = DT_{SP} = 0$  выражения (6) описывают метод 180СП. При  $PR = 1$  аналитические выражения описывают метод  $\overline{180СН_{П}}$  ( $\overline{180СН}$ ), а при  $PR = 0$  - метод  $\underline{180СН_{П}}$  ( $\underline{180СН}$ ).

Так как аналитические выражения при 60-градусном сдвиге сигналов о положении ротора отличаются от выражений при 120-градусном сдвиге только комбинацией логических переменных  $H_1$ ,  $H_2$  и  $H_3$ , то приведено описание только для одного метода  ${}_{60}180Д$  (7). Все остальные получаются на базе рассмотренных выше путём соответствующей замены сигналов о положении ротора.

Описание метода  ${}_{60}180Д$ :

$$\begin{aligned}
U_1 &= DR \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee DR \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee \overline{DR} \overline{H_2} \overline{H_3} SP; \\
U_2 &= DR \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee DR \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee \overline{DR} \overline{H_2} \overline{H_3} SP; \\
U_3 &= DR \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee DR \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_3} SP; \\
U_4 &= DR \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee DR \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_2} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_3} SP; \\
U_5 &= DR \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee DR \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_2} \overline{H_3} SP; \\
U_6 &= DR \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee DR \overline{H_2} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_1} \overline{H_3} SP \vee \overline{DR} \overline{H_2} \overline{H_3} SP.
\end{aligned} \tag{7}$$

Полученные выражения можно использовать при разработке компьютерной модели

ЦСУ и создания описания работы ЦСУ на языке описания цифровых устройств.

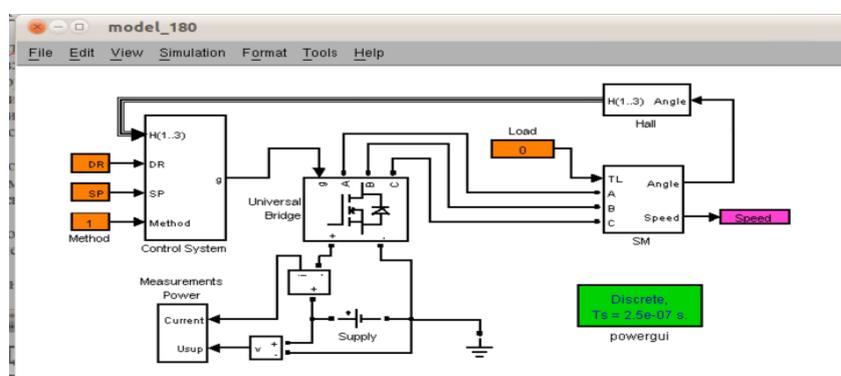
## Программный комплекс

В качестве инструментального средства для проведения компьютерного моделирования была выбрана система моделирования Simulink, позволяющая автоматизировать моделирование динамических систем, которые могут состоять из совокупности дискретных и непрерывных элементов (блоков), выполняющих преобразование энергии из одного вида в другой с учётом соответствующих потерь.

Программный комплекс состоит из компьютерной модели мехатронного модуля и двух модулей автоматизации.

Компьютерная модель мехатронного модуля, представленная на рис. 2, является иерархической и состоит из:

- блока ЦСУ (Control Systems), в котором реализованы рассмотренные выше методы коммутации;
- блоков формирования логических переменных  $DR$  и  $SP$ , а также задания текущего метода коммутации (Method) и статического момента нагрузки (Load). Логическая переменная  $PR$  формируется внутри блока ЦСУ;
- блока ИУМ (Universal Bridge), в котором, в качестве ключевых элементов, используются полевые транзисторы (Mosfet);
- блока СД, учитывающего соединение фаз в «звезду», наличие взаимной индуктивности между фазами, сухое и вязкое трение, а также число пар полюсов и синусоидальное распределение индукции в зазоре между статором (якорем) и ротором (индуктором). Модель блока взята из [5];
- блока ДПР (Hall);
- блока источника постоянного напряжения (Supply);
- стандартных блоков измерения тока и напряжения, а также блока Measurements Power, позволяющего определить среднюю потребляемую мощность;
- блока powergui для управления электрическими компонентами модели.



**Рис. 2.** Компьютерная модель мехатронного модуля

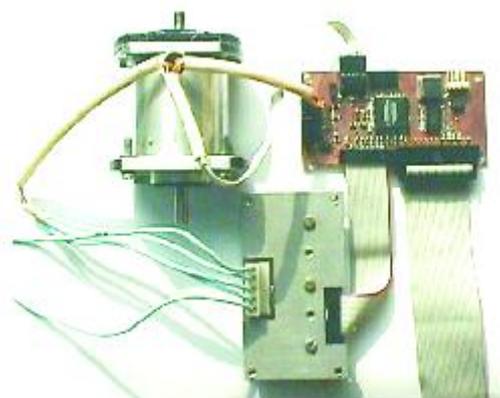
Упрощённый вариант модуля, реализованного на языке Matlab и позволяющего автоматизировать запуск модели с разными данными, представлен в следующем листинге.

**Листинг.** Модуль автоматизированного запуска модели ММ с разными начальными данными

```
ModelName = 'model_180';
% Формирование исходных данных
Gamma = 1:-0.05:0;
StartStaticLoad = -0.01;
EndStaticLoad = 0.065;
StepStaticLoad = 0.005;
ShiftStaticLoad = -0.0014;
for k = 1:size(Gamma,2)
    LoadMoments(k) = { StartStaticLoad:StepStaticLoad:EndStaticLoad };
    StartStaticLoad = StartStaticLoad + ShiftStaticLoad;
    EndStaticLoad = EndStaticLoad + ShiftStaticLoad;
    Speeds(k) = { zeros(1,size(LoadMoments{k},2)) };
    Powers(k) = { zeros(1,size(LoadMoments{k},2)) };
end
clear 'ShiftStaticLoad' 'StepStaticLoad' 'EndStaticLoad' 'StartStaticLoad'
% Задание параметров моделирования
set_param(ModelName, 'StartTime','0', 'StopTime','1.5',...
    'Solver','ode15s', 'AbsTol','1e-4', 'RelTol','1e-4');
set_param( [ ModelName '/Supply' ], 'Amplitude', num2str( 27 ) );
set_param( [ ModelName '/SP/gPulse' ], 'Period', '1/20000' );
set_param( [ ModelName '/Method' ], 'Value', int2str( 10 ) );
% Запуск модели с различными параметрами и сохранение полученных данных
for k = 2:size(Gamma,2)
    for n = 1:size(LoadMoments{k},2)
        if ( Gamma(k) == 0 ) || ( Gamma(k) == 1 )
            set_param( [ ModelName '/SP/gType' ], 'Value', '1' );
            set_param( [ ModelName '/SP/g100' ], 'Value', int2str(Gamma(k)) );
        else
            set_param( [ ModelName '/SP/gType' ], 'Value', '0' );
            set_param( [ModelName '/SP/gPulse'], 'PulseWidth', num2str(Gamma(k)*100) );
        end
        set_param( [ ModelName '/Load' ], 'Value', num2str( LoadMoments{k}(n) ) );
        str = ['Current parameters: gamma = ' num2str(Gamma(k))...
            '; Moment = ' num2str( LoadMoments{k}(n) ) ];
        disp( str );
        tic, sim( ModelName ); Time = toc;
        Speeds{k}(n) = Speed(end);
        Powers{k}(n) = double(Power(end));
        clc
        str=['Duty cicle = ' num2str(Gamma(k)) '; Load = ' num2str(
LoadMoments{k}(n)) ...
            '; Speed = ' num2str(Speeds{k}(n)) '; Power = ' num2str(Powers{k}(n))];
        disp( str );
        str = ['Simulation time, sec: ' num2str(Time)];
        disp( str );
        save 'alternative_180_20kHz.mat' LoadMoments Speeds Powers
    end
end
clear 'LoadMoments' 'Speeds' 'Powers'
```

### **Макетный образец мехатронного модуля**

Макетный образец мехатронного модуля, показанный на рис. 3, состоит из трёхфазного двигателя ДБМ 40-0,025-4-3 с датчиком положения ротора (ДПР), платы ЦСУ, платы ИУМ и набора проводов, соединяющих вышеназванные части, а также сам мехатронный модуль с источником питания и параллельным портом компьютера.



**Рис. 3.** Макетный образец мехатронного модуля

На плате ЦСУ размещены: программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), с помощью которой реализуются цифровые алгоритмы управления вентильным двигателем, включающие различные методы коммутации, генератор импульсов, разъёмы и целый ряд пассивных элементов (резисторы и конденсаторы).

На плате ИУМ располагаются три стойки, каждая из которых включает драйвер усиления и два силовых транзистора фирмы International Rectifier.

ДПР состоит из трёх датчиков Холла фирмы Honeywell, сдвинутых друг относительно друга на угол 120 градусов.

Формирование управляющих сигналов и подача их на параллельный порт компьютера осуществлялись с помощью разработанной на языке Delphi программы.

### **Сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований**

Для сравнения использовались случаи первого, второго и четвёртого импульсных

режимов при соответствующих методах коммутации, охватывающие варианты непрерывного и прерывистого токов, а также однополярные и двухполярные импульсы напряжения питания, что является достаточным для подтверждения адекватности разработанной модели. На рис. 4-7 представлены соответственно цифровые сигналы, фазные напряжения относительно «земли» и «нейтральной точки», а также фазные токи в установившемся режиме работы. На рис. 8 показаны эпюры цифрового сигнала, фазного напряжения относительно «земли» и тока в момент реверсирования. На рис. 9-17 приведены соответственно эпюры цифровых сигналов, фазных напряжений относительно «земли», фазных токов в установившемся режиме при методах 180С, 180П и 180Д.

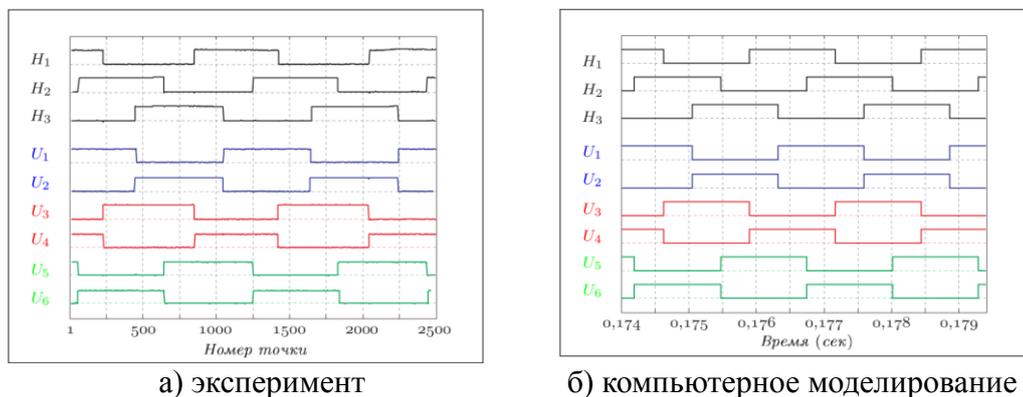


Рис. 4. Цифровые сигналы при единичной скважности

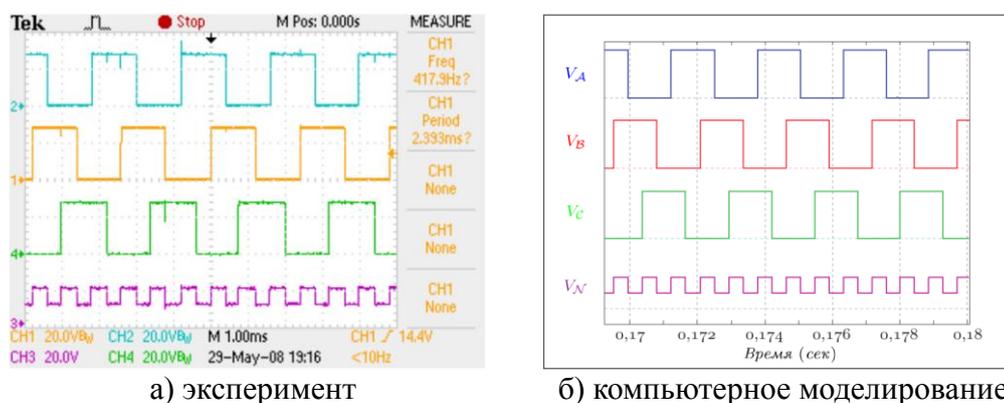
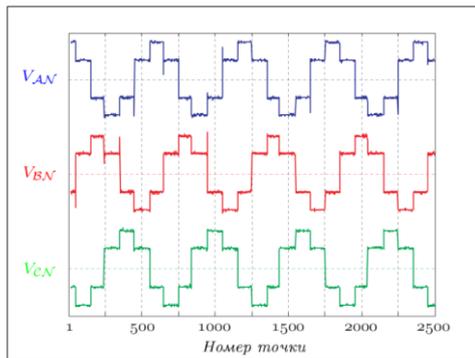
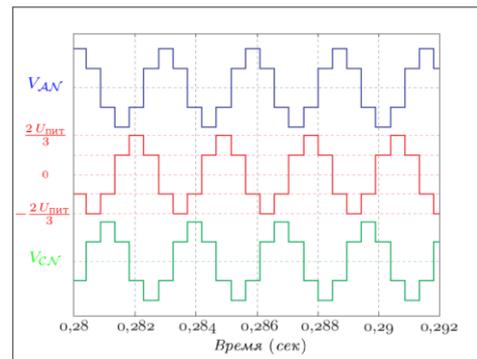


Рис. 5. Фазные напряжения относительно «земли» при единичной скважности

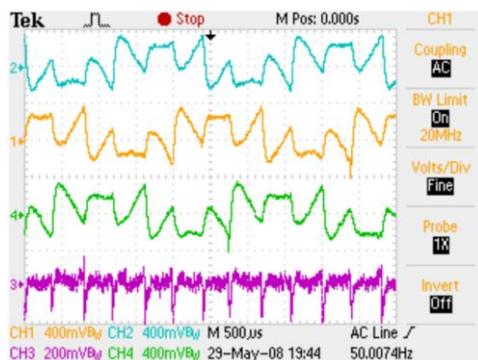


а) эксперимент

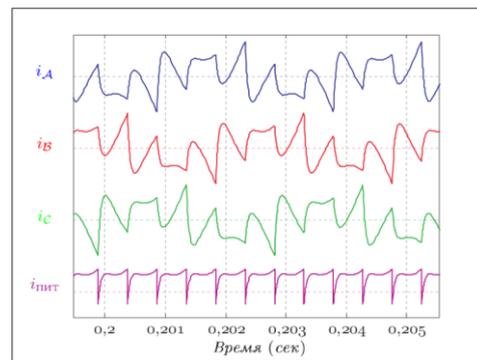


б) компьютерное моделирование

Рис. 6. Фазные напряжения относительно нейтральной точки при единичной скважности

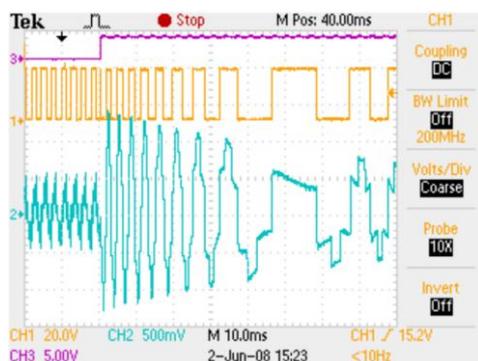


а) эксперимент

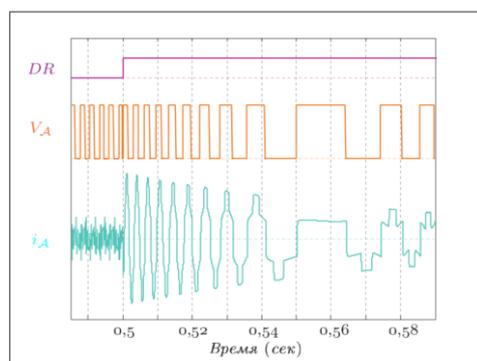


б) компьютерное моделирование

Рис. 7. Фазные токи при единичной скважности

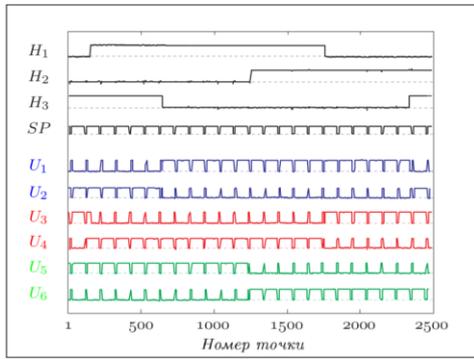


а) эксперимент

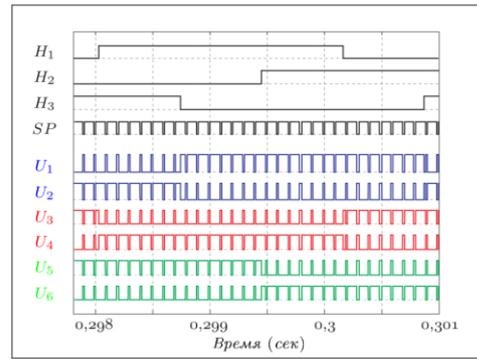


б) компьютерное моделирование

Рис. 8. Сигнал  $DR$ , напряжение  $V_A$  и ток  $i_A$  в момент реверса

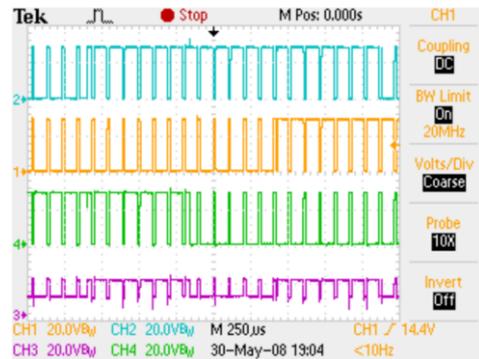


а) эксперимент

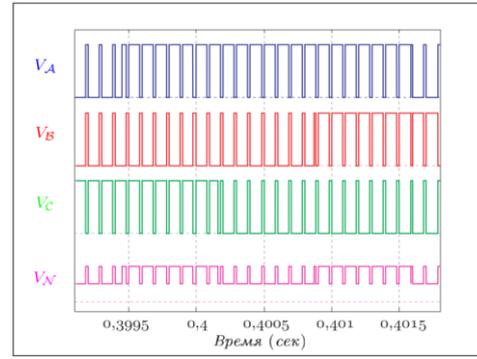


б) компьютерное моделирование

Рис. 9. Цифровые сигналы при методе 180С

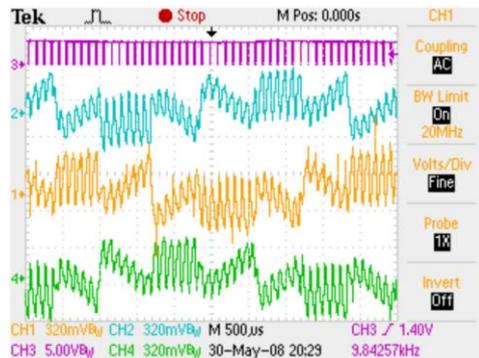


а) эксперимент

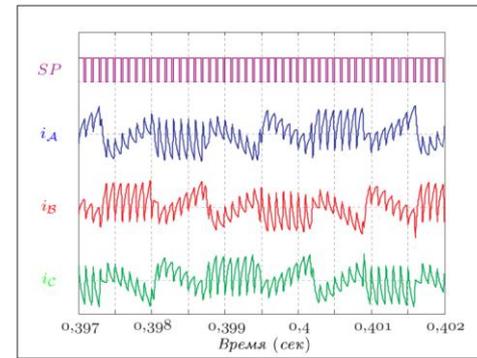


б) компьютерное моделирование

Рис. 10. Фазные напряжения относительно «земли» при методе 180С

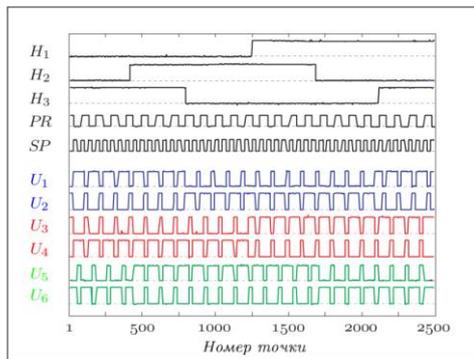


а) эксперимент

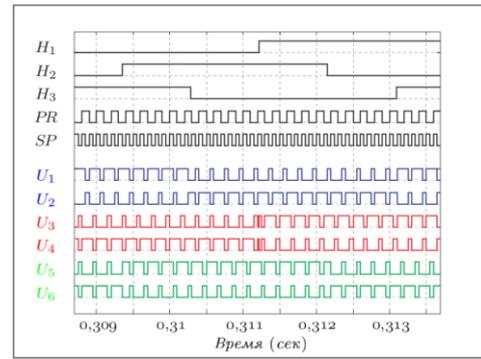


б) компьютерное моделирование

Рис. 11 Фазные токи при методе 180С

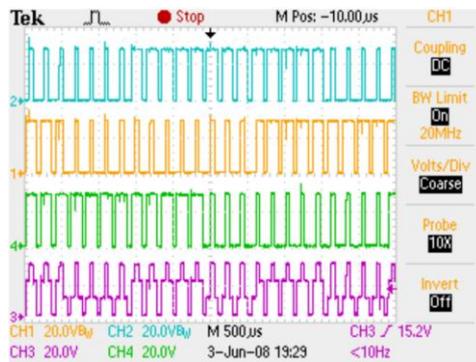


а) эксперимент

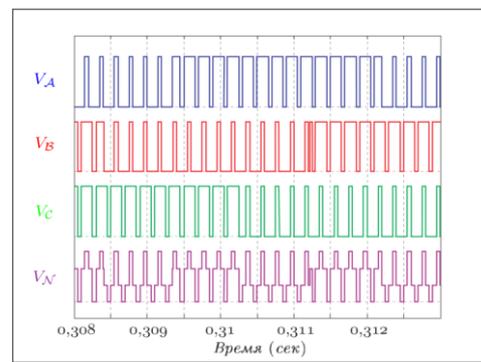


б) компьютерное моделирование

Рис. 12. Цифровые сигналы при методе 180П

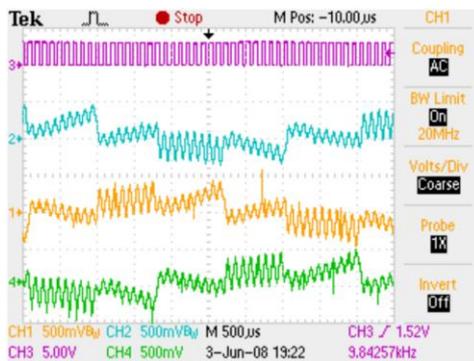


а) эксперимент

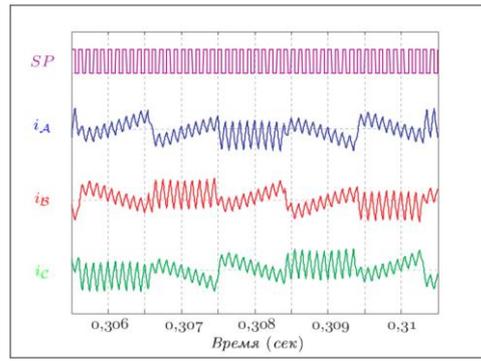


б) компьютерное моделирование

Рис. 13. Фазные напряжения относительно «земли» при методе 180П

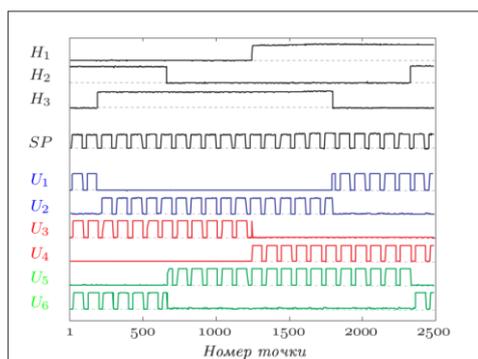


а) эксперимент

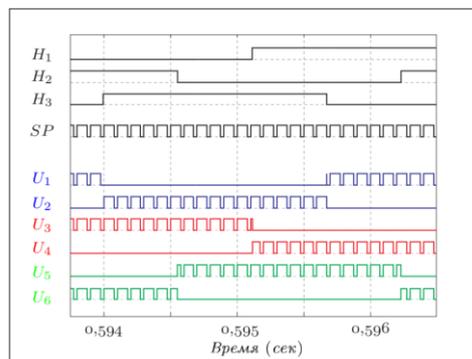


б) компьютерное моделирование

Рис. 14. Фазные токи при методе 180П



а) эксперимент

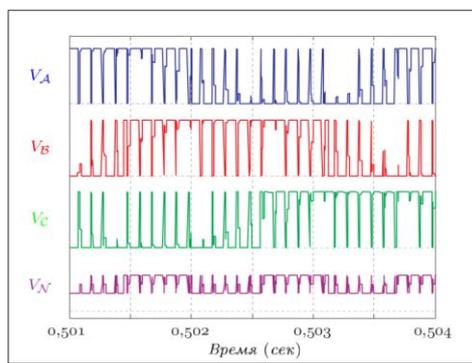


б) компьютерное моделирование

Рис. 15. Цифровые сигналы при методе 180Д

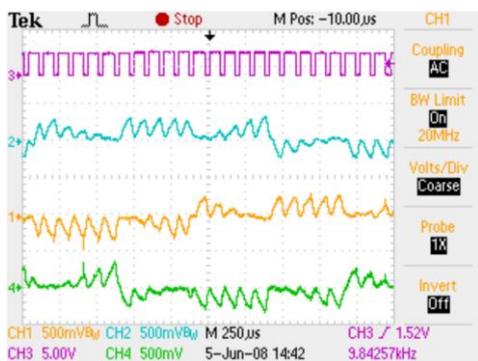


а) эксперимент

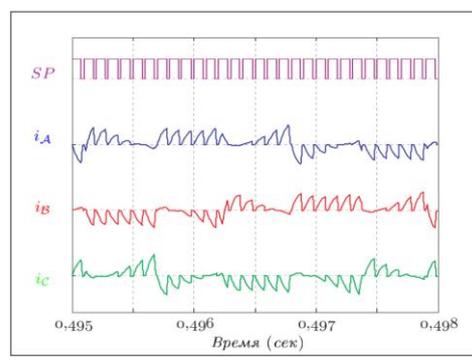


б) компьютерное моделирование

Рис. 16. Фазные напряжения относительно «земли» при методе 180Д



а) эксперимент



б) компьютерное моделирование

Рис. 17. Фазные токи при методе 180Д

На приведённых изображениях видно, что результаты моделирования и экспериментальные данные для всех случаев совпадают с необходимой для практики точностью.

### Механические характеристики

Механические характеристики, полученные после моделирования при частоте ШИС 10 кГц, представлены на рис. 18 для методов 180П, 180С и 180Д. Механические характеристики обоих вариантов метода Н совпадают с механическими характеристиками метода 180П. Механические характеристики методов 180СП (180СН) и 180ПД (180НД) по форме совпадают с характеристиками для тех же самых методов, приведёнными в [1], но с фазами, соединёнными в по схеме «треугольник».

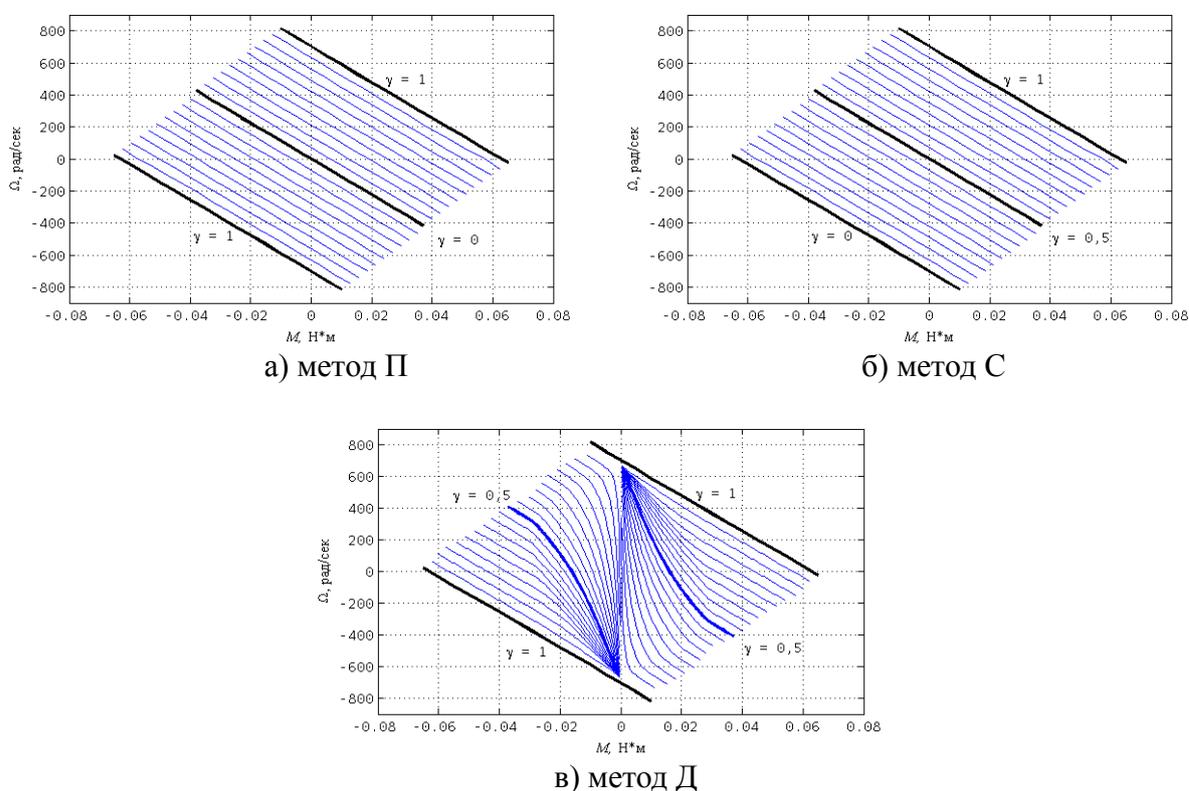


Рис. 18. Механические характеристики

Таким образом, механические характеристики методов 180П (180Н) и 180С линейные, а остальные характеристики содержат нелинейные области, связанные с соответствующими импульсными режимами. Для методов 180Д, 180ПД (180НД) нелинейная область является следствием наличия прерывистых токов (рис. 17) в фазах двигателя при нулевом значении

ШИС. При методе 180Д в нелинейной области имеет место четвёртый импульсный режим, а в случае метода 180ПД (180НД) — пятый импульсный режим. При методе 180СП (180СН) нелинейная область является переходной между механическими характеристиками метода 180С и метода 180П (180Н). Площадь как области прерывистых токов, так и переходной области зависит от частоты ШИС. При увеличении частоты ШИС область уменьшается, вырождаясь при  $f_{ШИС} = \infty$  в отрезок  $[-\Omega_{x.x}; \Omega_{x.x}]$ . Отличительной особенностью метода 180ПД (180НД) является отсутствие механических характеристик в области рекуперативного торможения.

Нелинейные области на механических характеристиках соответствуют нелинейным областям на регулировочных характеристиках. Следовательно, коэффициент передачи не является постоянным на всём диапазоне входного сигнала ( $U_{CP}$ ) при постоянном моменте нагрузки ( $M_H$ ).

В нелинейных областях значение механической постоянной времени не является постоянной величиной и превышает её значение в линейной области, что негативно влияет на динамику системы. Следовательно, методы 180СП (180СН), 180Д и 180ДП (180ДН) не рекомендуется использовать при проектировании привода, который работает во всех четырёх квадрантах.

### Энергетические характеристики

Энергетические характеристики, полученные в результате компьютерного моделирования, представлены на рис. 19—23. При определении энергетических характеристик не учитывались динамические потери в КЭ. Энергетические характеристики метода 180П и обоих вариантов метода 180Н совпадают.

Поверхности средней потребляемой мощности в двигательном режиме работы при методах 180П (180Н) и 180С показаны на рис. 19,а и б соответственно. При построении поверхностей использовались нормализованные величины:  $M_{CP}^* = |M_{CP} / M_{П}|$  - средний электродвижущий момент, где  $M_{П}$  пусковой момент;  $U_{CP}^* = |U_{CP} / U_{ПИТ}|$  - среднее значение подаваемого на обмотку напряжения, где  $U_{ПИТ}$  - напряжение питания. В случае метода 180П (180Н):  $U_{CP}^* = \gamma$ , а при методе 180С:  $U_{CP}^* = 2\gamma - 1$ . Максимальное значение средней потребляемой мощности соответствует точке пускового момента  $P_{CP,MAX} \approx 48,23$  Вт. В

номинальном режиме работы ( $M_H \approx 0,1 M_{II}$ ) при единичной скважности  $P_{CP.HOM} \approx 6,46$  Вт.

Поверхности теряемой мощности в двигательном режиме работы для методов 180П (180Н) и 180С представлены на рис. 20, *a* и *б* соответственно. Максимальная теряемая мощность соответствует точке пускового момента и равна средней потребляемой мощности  $P_{ПОТ.МАХ} = P_{СР.МАХ}$ . Потери мощности в номинальном режиме работы при единичной скважности  $P_{ПОТ.МАХ} \approx 2,5$  Вт. Поверхность теряемой мощности при методе 180С располагается на поверхности при методе 180П (180Н), что связано с повышенными дополнительными потерями при пульсации тока.

Поверхность механической мощности, изображённая на рис. 21, соответствует обоим методам. Максимальное значение механической мощности  $P_{МЕХ.МАХ} \approx 11$  Вт имеет место при единичной скважности и  $M_{СР}^* = 0,5$ .

Поверхности КПД для методов 180П (180Н) и 180С приведены на рис. 22 *a* и *б* соответственно. Максимальное значение КПД  $\eta \approx 0,64$  имеет место при единичной скважности и  $M_{СР}^* = 0,16$ .

Отличительной особенностью импульсного управления посредством ШИС является наличие дополнительных потерь мощности  $\Delta P$ , которые связаны с пульсациями тока. Поверхности дополнительных потерь при методах 180П (180Н) и 180С при частоте ШИС 10 кГц и 20 кГц представлены на рис. 23, *a* и *б* соответственно. В случае метода 180П (180Н) при  $f_{ШИС} = 10$  кГц  $\Delta P_{МАХ} \approx 0,95$  Вт, а при  $f_{ШИС} = 20$  кГц  $\Delta P_{МАХ} \approx 0,25$  Вт, что составляет примерно 38 % и 10 % от теряемой мощности при номинальном режиме работы. В случае метода 180С при  $f_{ШИС} = 10$  кГц дополнительные потери мощности  $\Delta P_{МАХ} \approx 3,7$  Вт, а при  $f_{ШИС} = 20$  кГц  $\Delta P_{МАХ} \approx 1,0$  Вт, что составляет примерно 148 % и 40 % от теряемой мощности при номинальном режиме работы. Максимальные значения дополнительных потерь мощности в обоих случаях имеют место при  $\gamma = 0,5$ . Так как при методе 180С дополнительные потери примерно в 4 раза больше, чем при методе 180П (180Н), то целесообразней использовать метод 180П (180Н). Дополнительные потери мощности являются приемлемыми, если  $\Delta P_{МАХ} \leq 0,1 P_{ПОТ.НОМ}$ . Следовательно, частота ШИС при методе 180П (180Н) должна быть равна или более 20 кГц. При выборе частоты ШИС также необходимо принимать во внимание наличие динамических потерь мощности в КЭ. В современных полупроводниковых устройствах силовой электроники при 20 кГц динамические потери минимальные и ими можно пренебречь.

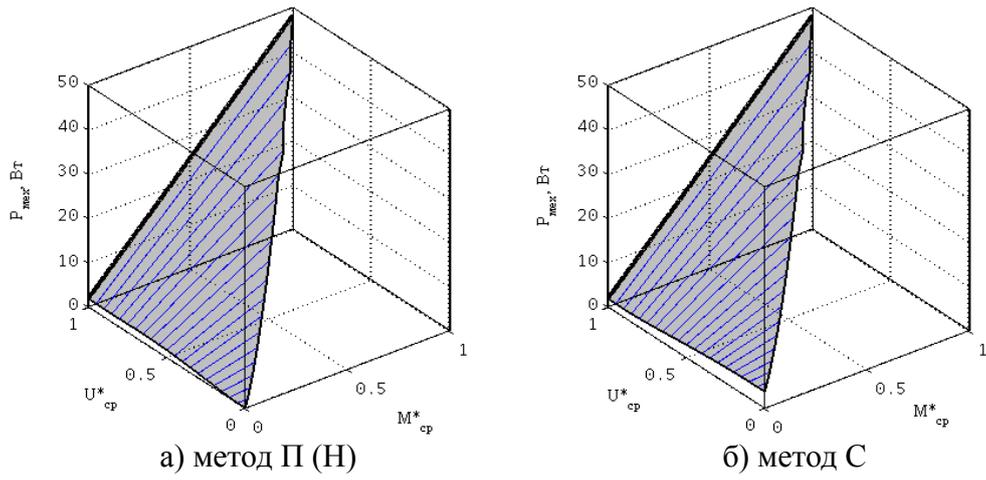


Рис. 19. Средняя потребляемая мощность

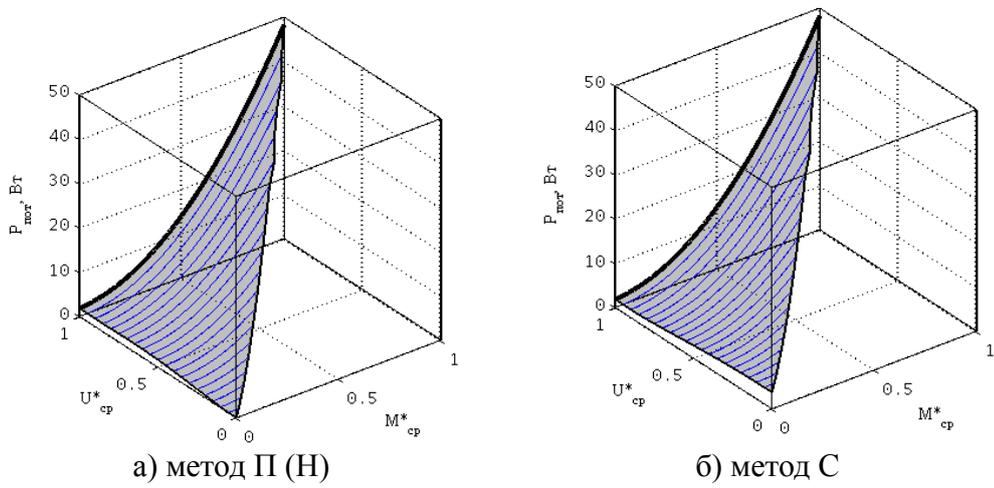


Рис. 20. Теряемая мощность

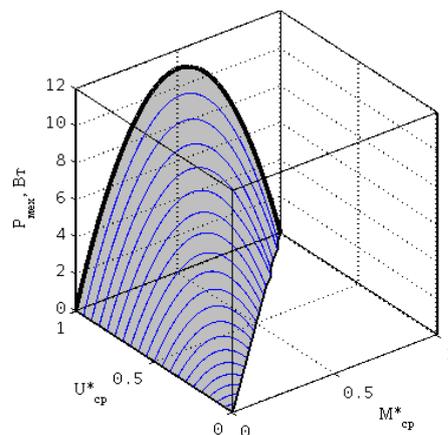


Рис. 21. Механическая мощность

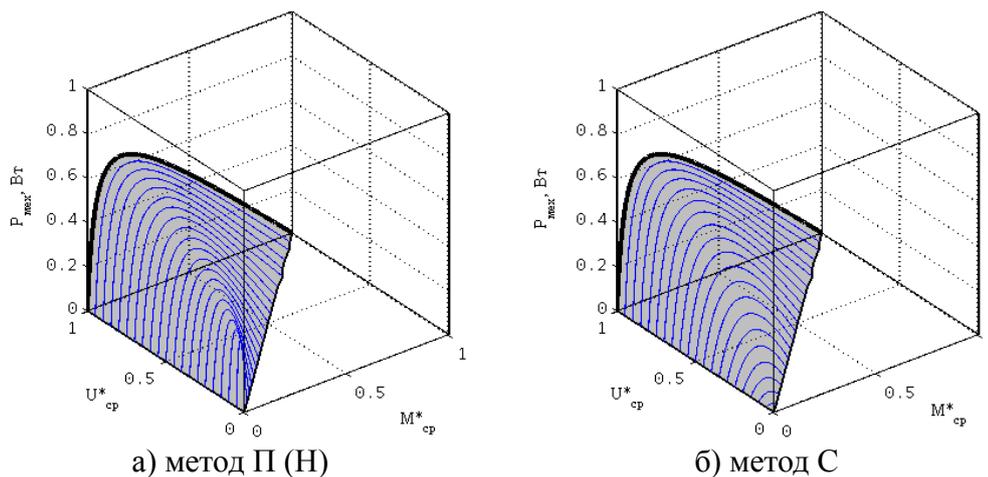


Рис. 22. Коэффициент полезного действия

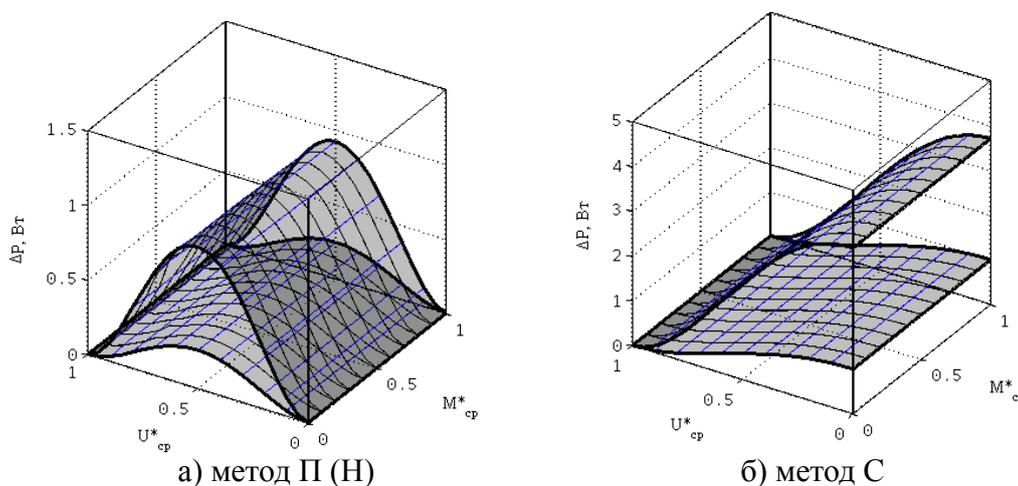


Рис. 23. Дополнительные потери мощности

## Выводы

Получены аналитические выражения для УБФ, реализующие методы симметричной, несимметричной, симметрично-несимметричной, поочерёдной, симметрично-поочерёдной, диагональной, несимметрично-диагональной и поочерёдно-диагональной 180-градусной коммутации КЭ при различном сдвиге сигналов о положении ротора как с учётом паузы при переключении КЭ, так и без её учёта. Математическое описание может быть использовано как при компьютерном моделировании ММ, так и программной реализации на одном из языков описания цифровых устройств с последующим программированием в реальное устройство.

Разработан программный комплекс, состоящий из модулей автоматизации и компьютерной модели мехатронного модуля на основе трёхфазного вентильного двигателя с фазами, соединёнными в «звезду». Модель позволяет исследовать падение напряжения на фазах двигателя и между ними, а также форму токов в фазах двигателя и источнике питания в момент смены межкоммутационного интервала и на всём его протяжении как в установившемся режиме, так и во время переходного процесса при различных методах 180-градусной коммутации. Модули автоматизации служат для сокращения времени получения данных в установившемся режиме и построения на их основе статических и энергетических характеристик.

На языке ANDL сформированы модули, содержащие описания методов поочерёдной, симметричной и диагональной 180-градусной коммутации, которые в составе общего описания работы ЦСУ были запрограммированы в ПЛИС платы ЦСУ макетного образца ММ.

Проведены экспериментальные исследования и выполнен анализ полученных экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования, который позволяет сделать вывод, что компьютерная модель адекватна реальному образцу и может быть использована для получения его статических и энергетических характеристик при произвольных методах коммутации.

Получены статические и энергетические характеристики, на основании которых можно рекомендовать метод 180П для проектирования приводных систем, так как в отличие от других методов при нём отсутствует режим прерывистых токов, механические характеристики существуют во всех четырёх квадрантах и наряду с регулировочными характеристиками являются линейными, а теряемая мощность минимальна вследствие минимальных дополнительных потерь мощности, вызванных пульсациями тока.

Определено, что частота ШИС влияет на величину дополнительных потерь, а, следовательно, на теряемую мощность. Максимальное значение дополнительных потерь мощности при всех методах имеет место, когда скважность  $\gamma = 0,5$ . Максимальное значение дополнительных потерь мощности при методах С, Д, СП и СН примерно в четыре раза больше, чем при методах П, Н, ПД и НД в случае одинаковой частоты ШИС. Увеличение частоты ШИС в два раза при больших частотах переключения ( $T < T_{я}/2$ ) приводит к уменьшению максимального значения дополнительных потерь примерно в четыре раза. Для рассматриваемого двигателя определена верхняя граница частоты ШИС, начиная с которой дополнительные потери мощности будут менее 10 % от потерь мощности при номинальном режиме с единичной скважностью.

## Библиографический список

1. Гагарин С.А., Кривилев А.В., Ситникова А.В. Дополнительные потери мощности в мехатронном модуле привода на основе трёхфазного вентильного двигателя с фазами, соединёнными по схеме «треугольник» / Мехатроника, автоматизация, управление. 2010, №11, С.18-24.
2. Кривилев А.В. Математическое описание цифровой системы управления мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем / Мехатроника, автоматизация, управление. 2010, №7, С.40-48.
3. Кривилев А.В. Автоматизированный синтез управляющих булевых функций мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем / Известия РАН. Теория и системы управления. 2010, №2, С.153-163.
4. Кривилев А.В., Ситникова А.В. Автоматизированный анализ управляющего слова мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем / Известия РАН. Теория и системы управления. 2010, №3, С.5-13.
5. Кривилев А.В. Цифровая система управления мехатронного модуля привода с трёхфазным бесконтактным двигателем постоянного тока. Дис. на соискание учёной степени к.т.н. 05.09.03. М.: 2002 г. 335 с.

### **Сведения об авторах**

Кондратьев Александр Борисович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., e-mail: kondr48@mail.com

Кривилев Александр Владимирович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., e-mail: alexkrivilev@gmail.com

Ситникова Алла Владимировна, инженер ОАО «Корпорация «Иркут», соискатель Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел: (495) 777-21-01, e-mail: alla.sitnikova@irkut.com

