



II Международная научно-практическая конференция  
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно- импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения

Лопаткин Николай Николаевич  
АГПУ им. В.М. Шукшина, г. Бийск  
[nikolay\\_lopatkin@mail.ru](mailto:nikolay_lopatkin@mail.ru)

16-18 сентября 2020 г  
Воронеж, Россия





## РАССМАТРИВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ

1. Введение. Постановка задачи
2. Пространственно-векторная ШИМ с четвертьволновой симметрией выходных напряжений
3. Новая реализация пространственно-векторного управления с выбором ближайшего вектора
4. Среда моделирования и методика оценки коэффициента гармоник напряжения или тока элемента нагрузочной цепи
5. Оценка коэффициента гармоник тока нагрузки МУИН и разграничение использования двух методов
6. Выводы

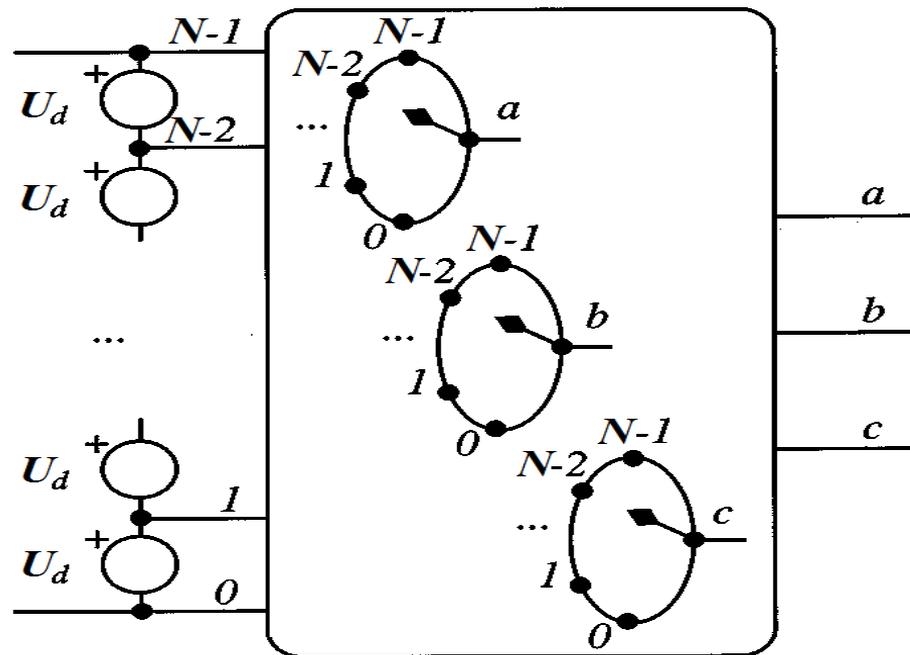


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения

# Введение

Функциональная схема трехфазного  $N$ -уровневого инвертора напряжения

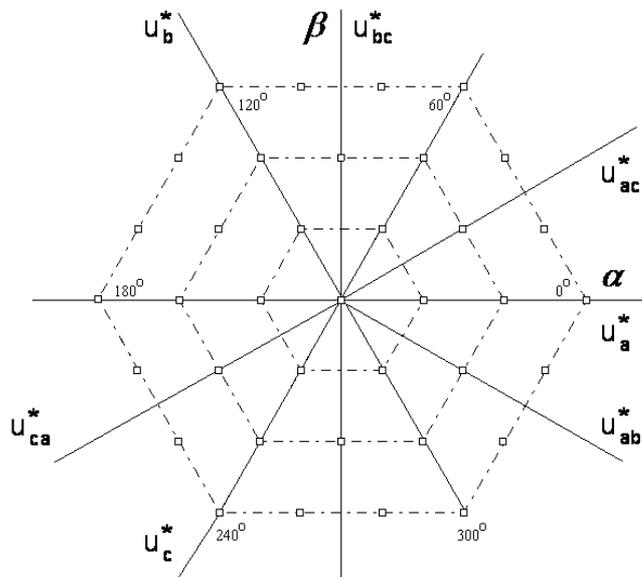




«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

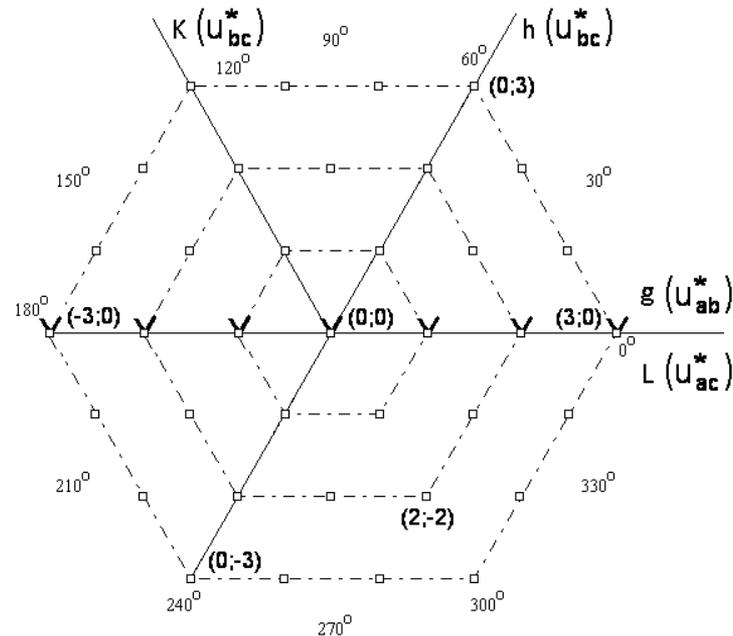
## Векторы возможных ключевых состояний МУИН

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторы широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения



Оси напряжений и ортогональная система координат

$$u_{xy}^* = \frac{u_{xy}}{U_d}$$



Системы gh-координат и LK-координат

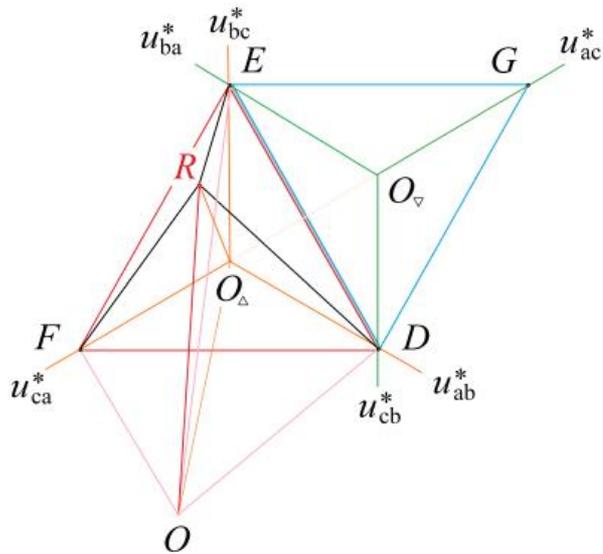
ОВН 
$$\dot{i} = \frac{2}{3} U_d \cdot \left( u_{ab}^* + u_{bc}^* \cdot e^{j\frac{\pi}{3}} \right)$$



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

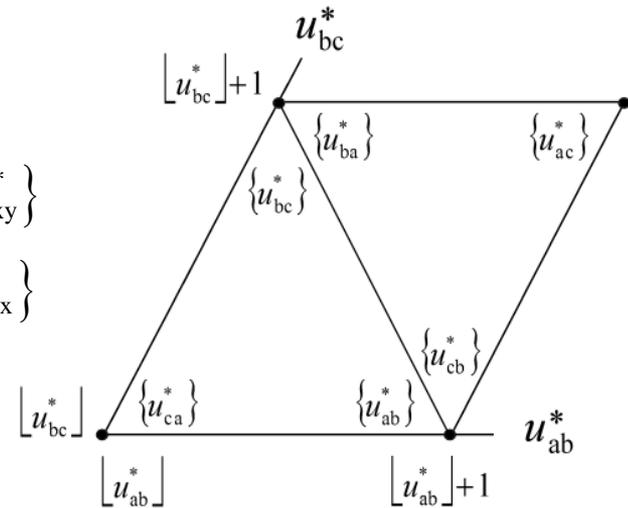
## Длительности действия трех ближайших векторов в векторной ШИМ как барицентрические координаты

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения



$$b_{xy} = u_{xy}^* - \lfloor u_{xy}^* \rfloor = \{u_{xy}^*\}$$

$$b_{yx} = u_{yx}^* - \lfloor u_{yx}^* \rfloor = \{u_{yx}^*\}$$



$$O_{\Delta} \dot{R} = b_{ab} \cdot O_{\Delta} \dot{D} + b_{bc} \cdot O_{\Delta} \dot{E} + b_{ca} \cdot O_{\Delta} \dot{F} \quad \dot{u} = O \dot{R} = b_{ab} \cdot O \dot{D} + b_{bc} \cdot O \dot{E} + b_{ca} \cdot O \dot{F}$$

$$O_{\nabla} \dot{R} = b_{ba} \cdot O_{\nabla} \dot{E} + b_{cb} \cdot O_{\nabla} \dot{D} + b_{ac} \cdot O_{\nabla} \dot{G} \quad \dot{u} = O \dot{R} = b_{ba} \cdot O \dot{E} + b_{cb} \cdot O \dot{D} + b_{ac} \cdot O \dot{G}$$

$$\dot{u} = O \dot{R} = O \dot{F} + F \dot{R} = O \dot{F} + b_{ab} \cdot F \dot{D} + b_{bc} \cdot F \dot{E} \quad O \dot{F} = \frac{2}{3} U_d \cdot \left( \lfloor u_{ab}^* \rfloor + \lfloor u_{bc}^* \rfloor \cdot e^{j\frac{\pi}{3}} \right) \quad F \dot{R} = \frac{2}{3} U_d \cdot \left( \{u_{ab}^*\} + \{u_{bc}^*\} \cdot e^{j\frac{\pi}{3}} \right)$$



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

# Постановка задачи

Решается задача управления МУИН на базе единого подхода, оперирующего со значениями целых и дробных частей относительных величин линейных напряжений задания и позволяющего **сочетать использование пространственно-векторного управления с выбором ближайшего вектора и низкочастотной пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции с четвертьволновой симметрией выходных напряжений**, применяя одну из указанных техник **в зависимости от вида обобщенной нагрузки МУИН и диапазона значений коэффициента амплитудной модуляции** для получения выходной энергии наилучшего из двух **альтернатив качества (рассматривается ток или напряжение интересующего элемента цепи нагрузки)** при малых динамических потерях в силовых полупроводниковых ключах.

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжений

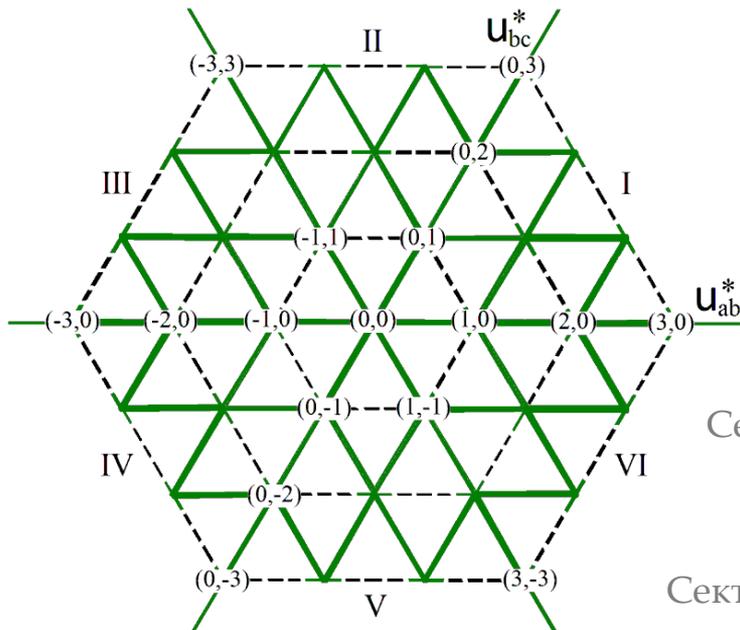


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНАЯ ШИМ С ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОЙ СИММЕТРИЕЙ ВЫХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Новая несимметричная последовательность переключения

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения



1 кольцо модуляционных треугольников:

$$\{(1,0),(0,0),(0,1); (0,1),(0,0),(-1,1); (-1,1),(0,0),(-1,0); (-1,0),(0,0),(0,-1); (0,-1),(0,0),(1,-1); (1,-1),(0,0),(1,0)\}$$

2 кольцо модуляционных треугольников:

Сектор I  $\{(2,0),(1,0),(1,1); (1,0),(1,1),(0,1); (1,1),(0,1),(0,2)\}$

Сектор II  $\{(0,2),(0,1),(-1,2); (0,1),(-1,2),(-1,1); (-1,2),(-1,1),(-2,2)\}$

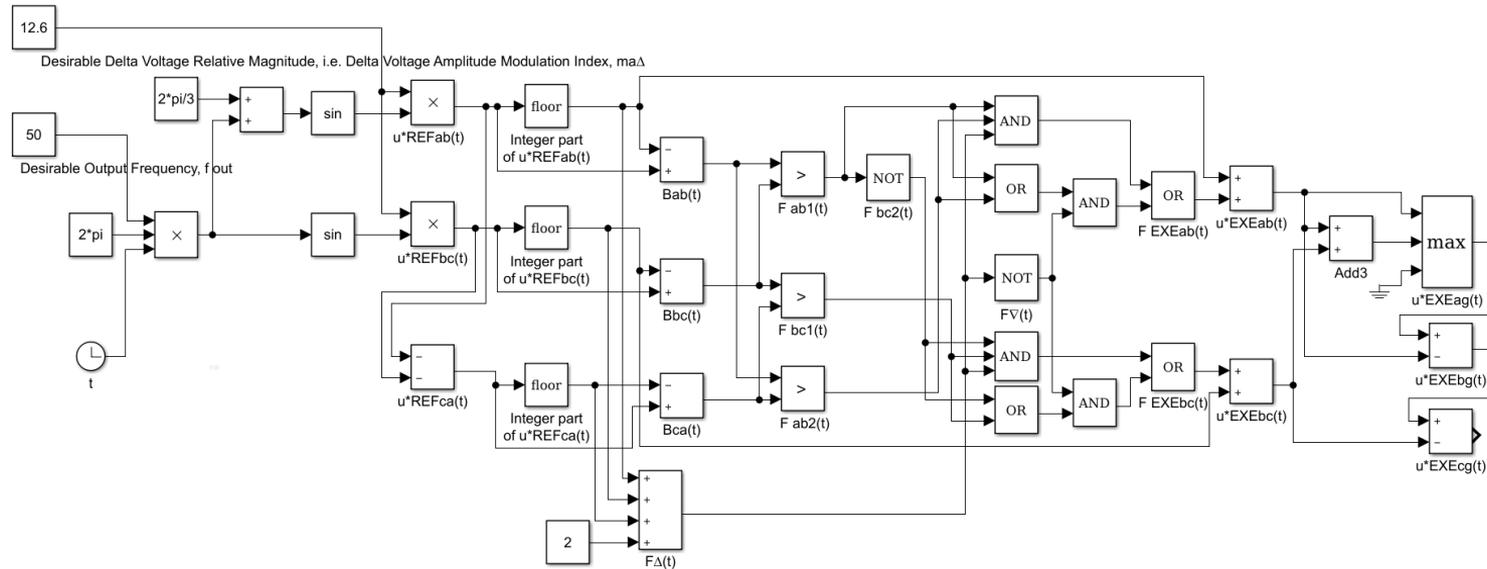
И так далее.

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

## НОВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ВЫБОРОМ БЛИЖАЙШЕГО ВЕКТОРА



Общий элемент двух техник – двухкомпонентное формирование сигналов задания генерируемых линейных напряжений:

$$u^*_{EXE_{xy}}(t) = \left[ u^*_{sREF_{xy}}(t) \right] + f_{s_{xy}}(t)$$



## СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ ИЛИ ТОКА ЭЛЕМЕНТА НАГРУЗОЧНОЙ ЦЕПИ

Сигналы задания генерируемых линейных напряжений синтезированы в LabVIEW, их параметры – интегральные коэффициенты гармоник (ИКГ) – оценены разработанным виртуальным инструментом, проверка соответствия величин силовой цепи сигналам задания выполнена в PSIM.

Коэффициент гармоник тока  $K_{hia} = I_{a(hh)} / I_{a(1)}$

находится с помощью метода алгебраизации дифференциальных уравнений АДУ (профессор Зиновьев Г.С., НГТУ), его атрибуты – ИКГ различных порядков. ИКГ порядка n:

$$\overline{K}_{hu}^{(n)} = WTHD^{(n)} = \frac{\overline{U}_{(hh)}^{(n)}}{\overline{U}_{(1)}^{(n)}} = \frac{\overline{U}_{(hh)}^{(n)} \cdot \omega^n}{U_{(1)}}$$

$$\overline{u}^{(n)} = \int \dots \left( \int u dt \right) \dots dt,$$

n раз

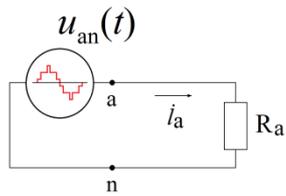
$$\overline{K}_{hu}^{(n)} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left( \frac{U_{(k)}}{k^n \cdot U_{(1)}} \right)^2}$$



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

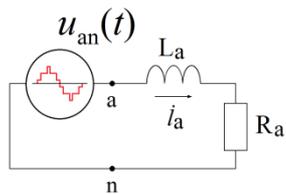
## ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ГАРМОНИК ТОКА НАГРУЗКИ МУИН И РАЗГРАНИЧЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХ МЕТОДОВ

Совместное использование вektора ближайшего вektора и вektорной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения



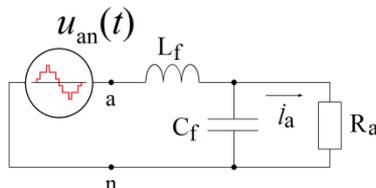
$$R_a i_a = u_a$$

$$K_{hia} = K_{hb} = \bar{K}_{hu}^{(0)}$$



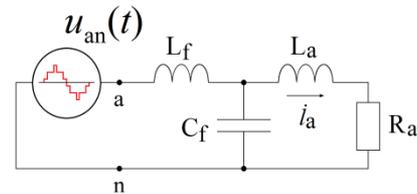
$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = u_a \quad i_a + \frac{R_a}{L_a} i_a = \frac{1}{L_a} u_{an}^{(-1)}$$

$$K_{hia} \approx \bar{K}_{hu}^{(1)} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R_a}{\omega L_a} \right)^2 \right]^{1/2}$$



$$i_a + \frac{1}{R_a C_f} i_a^{(-1)} + \frac{1}{L_f C_f} i_a^{(-2)} = \frac{1}{L_f C_f R_a} u_a$$

$$K_{hia} \approx \bar{K}_{hu}^{(2)} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{1}{(R_a C_f)^2} - \frac{2}{L_f C_f} \right) \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{(L_f C_f)^2 \omega^4} \right]^{1/2}$$



$$i_a + a_1 i_a^{(-1)} + a_2 i_a^{(-2)} + a_3 i_a^{(-3)} = b_3 u_a$$

$$a_1 = \frac{R_a}{L_a} \quad a_2 = \frac{1}{C_f} \left( \frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_a} \right)$$

$$a_3 = \frac{R_a}{L_f C_f L_a} \quad b_3 = \frac{1}{L_f C_f L_a}$$

$$K_{hia} \approx \bar{K}_{hu}^{(3)} \cdot \left[ 1 + \frac{a_1^2 - 2a_2}{\omega^2} + \frac{a_2^2 - 2a_1 a_3 + \frac{a_3^2}{\omega^6}}{\omega^4} \right]^{1/2}$$

Коэффициент гармоник тока пропорционален ИКГ порядка, равного порядку цепи и диф. уравнения

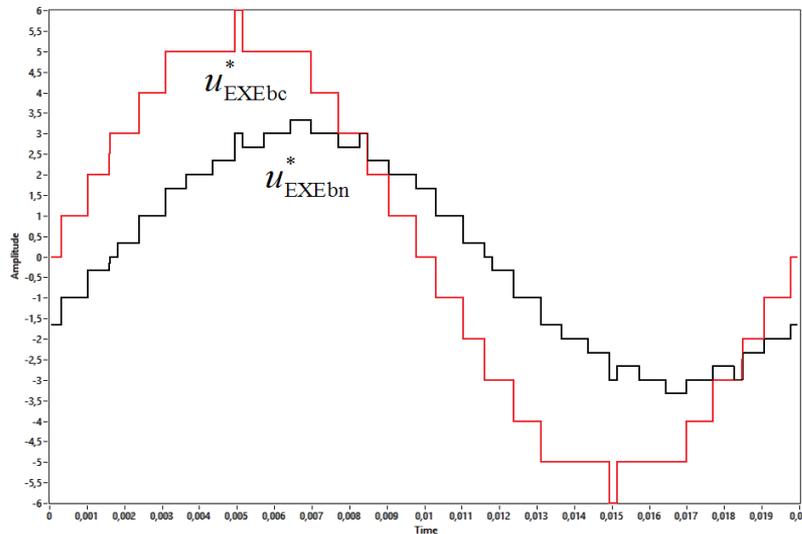


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

## Результаты моделирования в LabVIEW

### Пример идеализированных осциллограмм выходных напряжений

#### Пространственно-векторное управление



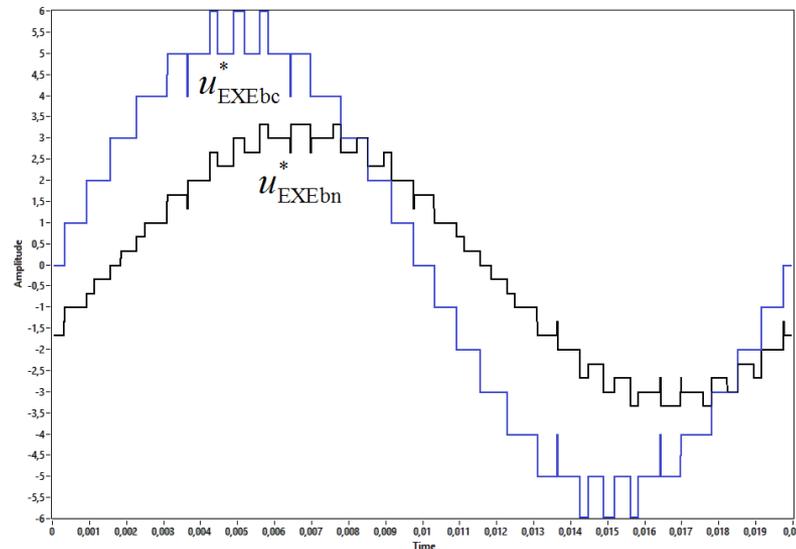
$m_{aY} = 3.14$

повышенное значение  $m_{sf}$

(для соответствия «непрерывному контролю»)

$m_{aY} = U/U_d = U^*$  - коэффициент амплитудной модуляции фазного напряжения

#### Пространственно-векторная ШИМ



$m_{aY} = 3.14$

$m_{sf} = 30$

$m_{sf} = f_s / f = T / T_s$

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжения

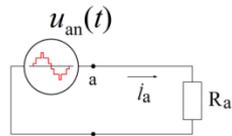
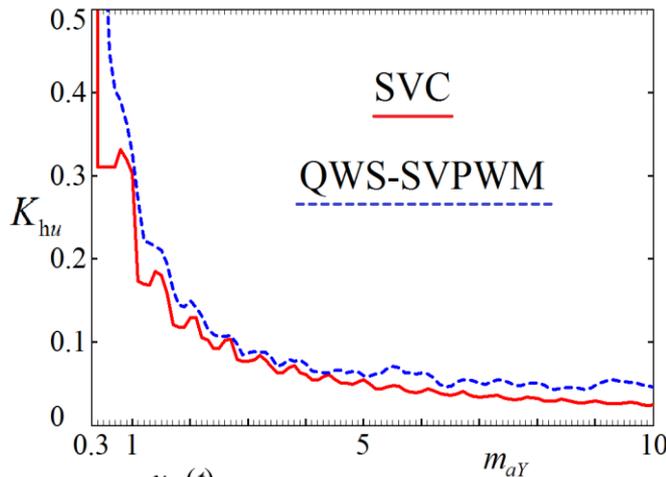


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

## Результаты моделирования в LabVIEW

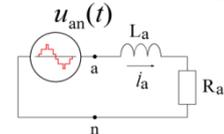
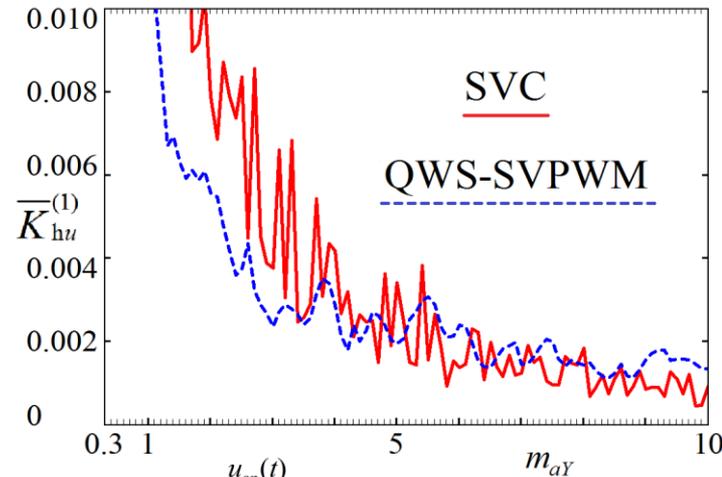
### Интегральные коэффициенты гармоник выходных напряжений МУИН

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжений



При  $m_{a\gamma} > 1/3$

используется пространственно-векторное управление с выбором ближайшего вектора



При  $m_{a\gamma} \leq 5.1$

используется пространственно-векторная ШИМ с четвертьволновой симметрией выходных напряжений

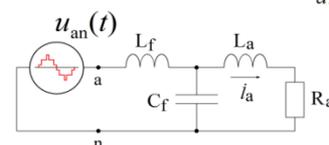
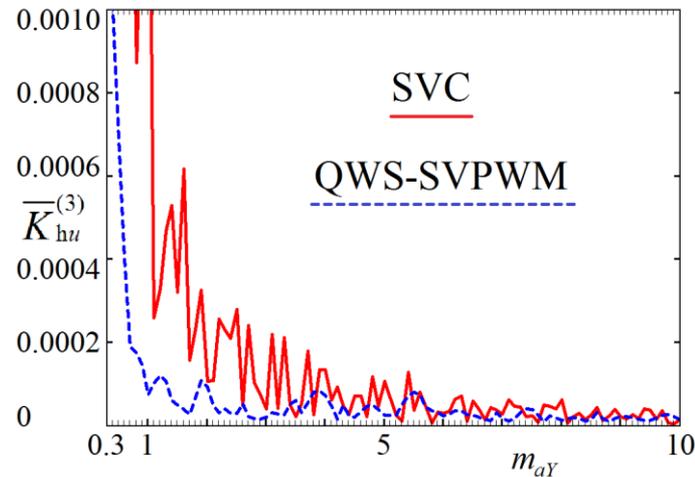
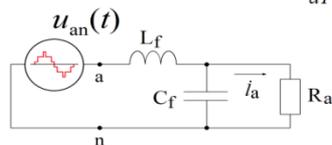
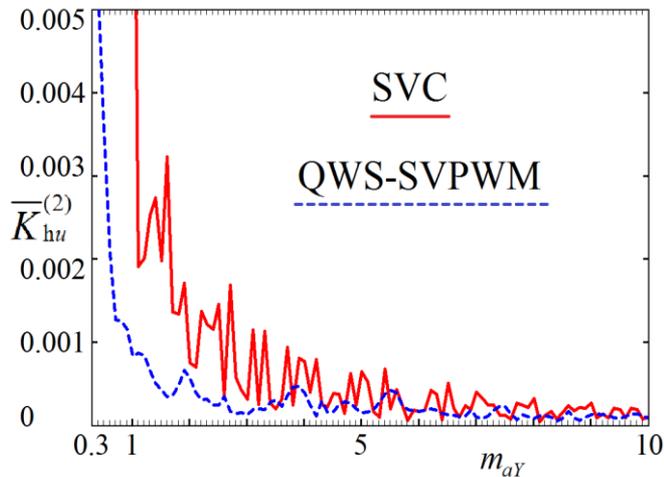


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

## Результаты моделирования в LabVIEW

### Интегральные коэффициенты гармоник выходных напряжений МУИН

Совместное использование выбора ближайшего вектора и векторной широтно-импульсной модуляции в управлении трехфазным многоуровневым инвертором напряжений



Используется пространственно-векторная ШИМ с четвертьволновой симметрией выходных напряжений



# Выводы

«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Разработан комбинированный алгоритм управления трехфазным многоуровневым инвертором напряжения с любой схемой конфигурации и любым количеством равных уровней выходного напряжения для повышения качества его выходной мощности, а именно КГ некоторой заданной выходной переменной. Подход ориентирован на минимизацию интегрального коэффициента гармоник напряжения (взвешенного КГ) с порядком, зависящим от вида эквивалентной схемы обобщенной нагрузки. Алгоритм использует пространственно-векторное управление, заключающееся в выборе ближайшего к опорному вектору вектора, и недавно предложенную методику пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции с четвертьволновой симметрией выходного напряжения для сохранения низкочастотного характера коммутаций силовых ключей и низкого уровня связанных с ними потерь в них. Комбинированный алгоритм основан на обработке значений целых и дробных частей отсчетов относительных значений опорных линейных напряжений и реализации двухкомпонентного формирования двух выходных напряжений. Полученные кривые зависимостей коэффициентов интегральных гармоник напряжения от индекса амплитудной модуляции фазного напряжения позволили разграничить режимы и выявить диапазоны применения двух альтернатив.



**Спасибо за внимание! Welcome to Altai !**

