

Виконано розробку методів дослідження несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів. Визначено вплив несиметрії напруги джерела живлення на роботу асинхронного електроприводу. Запропоновано систему автоматичного симетрування струмів статора асинхронного двигуна із застосуванням тиристорного перетворювача напруги. Розглянуто синтез елементів системи симетрування, і принципи її роботи, визначені показники симетрування та дані рекомендації із застосування системи

Ключові слова: асинхронний двигун, тиристорний перетворювач, електропривод, несиметрія напруг, коефіцієнт несиметрії, система автоматичного симетрування

Выполнена разработка методов исследования несимметричных режимов работы асинхронных двигателей. Определено влияние несимметрии напряжения источника питания на работу асинхронного электропривода. Предложена система автоматического симметрирования токов статора асинхронного двигателя с применением тиристорного преобразователя напряжения. Рассмотрен синтез элементов системы симметрирования и принципы ее работы, определены показатели симметрирования и даны рекомендации по применению системы

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь, электропривод, несимметрия напряжений, коэффициент несимметрии, система автоматического симметрирования

УДК 62–83 : 621.313.333

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60544

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СИММЕТРИРОВАНИЯ ТОКОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

А. А. БойкоДоктор технических наук, доцент, директор
Институт электромеханики и энергоменеджмента*

E-mail: dart77@ukr.net

В. В. БудашкоКандидат технических наук, доцент
Кафедра технической эксплуатации флота**

E-mail: bvv@te.net.ua

Е. А. ЮшковАспирант
Кафедра судовой электромеханики и электротехники**

E-mail: eugene_86@mail.ru

Н. А. Бойко

Аспирант

Кафедра электромеханических
систем с компьютерным управлением**Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044**Национальный университет «Одесская морская академия»
ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029

1. Введение

В настоящее время асинхронный электропривод является наиболее распространенным типом электрического привода в мире и является одним из главных потребителей электрической энергии [1]. В то же время нормативные показатели качества этой энергии в промышленности не всегда соответствуют требуемым, что определяет возможность работы асинхронных двигателей (АД), например в условиях несимметрии источника питания [2]. Также, возникновение несимметричных режимов работы трехфазных АД может быть обусловлено и другими факторами, например несимметрией сопротивлений в цепях статора или ротора [3].

Несимметричные режимы работы оказывают крайне отрицательное влияние на рабочие показатели АД. При несимметрии напряжения в электрических машинах возникают магнитные поля, вращающиеся с синхронной скоростью не только в направлении вращения ротора, но в противоположном направлении. В результате возникают тормозной электромагнитный момент и колебательная составляющая электромагнитного момента с частотой колебания сто герц. Возникает дополнительный нагрев активных частей АД, прежде всего статора за счет превышения фазных токов номинального значения [3]. При характере несимметрии напряжения с одновременным его понижением нагрузка по фазам обмоток АД распределяется неравномерно,

что приводит к перегреву обмоток даже при моментах нагрузки существенно меньших номинального. Так, при работе двигателя с номинальным моментом нагрузки и при питании от источника с несимметричным напряжением, характеризующимся $K_u=4\%$, срок службы изоляции АД сокращается примерно в два раза только за счет дополнительного нагрева [2, 3]. При этом, если напряжение на одной из фаз значительно превышает номинальное, сокращение срока службы изоляции будет еще большим. Для обеспечения нормальных условий работы АД при питании от источника с несимметричным напряжением необходимо превышать номинальную мощность, предусматривать специальные мероприятия по симметрированию напряжения источника питания (ИП), или применять другие конструктивные решения [4].

2. Анализ литературы и постановка проблемы

Большинством исследователей предлагается рассматривать все виды несимметрии в отдельности. Так, отмечается, что несимметрия собственных параметров АД практически не поддается коррекции в условиях эксплуатации, и решение проблемы видится в компенсации отрицательных последствий этой несимметрии только средствами замкнутых систем управления [3].

В работе [5] говорится, что допустимая несимметрия углов включения тиристоров в ТПН составляет 1,5 эл. град. для схемы с шестью тиристорами и примерно 3 эл. град. для схемы ТПН с тремя тиристорами и тремя диодами, менее чувствительной к несимметрии. Для исключения асимметрии управляющих импульсов, обусловленной различием характеристик каналов управления, предлагается применять одноканальные синхронные СИФУ с одним общим для всех фаз осциллограмм устройством [6].

Известно, что несимметрия напряжения в электрических сетях возникает при работе мощных однофазных нагрузок, или трехфазных, работающих длительно в несимметричных режимах, в том числе и в аварийных [2, 7]. Коэффициент несимметрии K_u , определяющий величину несимметрии напряжения ИП, нормируется. Значение $K_u < 2\%$ длительно допустимо на зажимах любого трехфазного потребителя. Предельно-допустимое значение коэффициента составляет $K_u < 4\%$ [2]. Однако во многих работах отмечается, что на практике эти величины не всегда соответствуют ГОСТам и могут значительно превышать их [8]. В табл. 1 приведены характерные значения коэффициентов несимметрии напряжения для различных отраслей промышленности.

Таблица 1

Значения коэффициентов несимметрии напряжения в отраслях промышленности Украины

Отрасль промышленности	$K_u, \%$
Черная металлургия	1,2...8
Цветная металлургия	2...8
Машиностроение	1...5
Целлюлозно-бумажная промышленность	0...2,2
Горнодобывающая промышленность	0,2...3

Описанию устройств, работа которых направлена на улучшение показателей качества питающих напряжений, посвящено немало научно-методических работ [2, 7, 9, 10]. В то же время отмечается, что их использование полностью не решает проблему симметрии напряжений, питающих электроприемник, ввиду сложности одних, дороговизны других, или ограниченного функционала третьих. Критерием применения предлагаемых устройств является работа в условиях существенной несимметрии ($K_u > 4...6\%$) [7, 10]. Если несимметрия напряжения ИП не столь существенна или возникает кратковременно, их применение чаще всего не оправдано и приводит к бесполезности при восстановлении показателей качества напряжения ИП.

Перспективной и актуальной является задача по разработке многофункциональных электромеханических систем, которые обеспечивали бы формирование необходимых режимов работы АД при нормальных условиях работы, а при нарушении показателей качества питающего напряжения, реализовывали режимы симметрирования, причем стоимость и эксплуатационные затраты таких электромеханических систем были минимальны. Некоторыми из исследователей электропривода «Тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» (ТПН–АД) с фазовым параметрическим управлением предполагается такая возможность [4, 6]. Подобную замкнутую электромеханическую систему можно характеризовать как систему автоматического симметрирования (САС) токов статора асинхронного двигателя. В работах говорится о принципиальной возможности подобных систем, которые заключаются в введении в тиристорный преобразователь напряжения искусственной асимметрии по углам включения тиристоров с целью симметрирования токов статора АД [4, 11]. В то же время не говорится о технической реализации САС, особенностях режимов работы, критериях управления, и, главное, о результатах симметрирования. Это препятствует возможности практического использования подобных систем, выявлению их достоинств, недостатков и возможности рекомендаций по применению.

3. Цель и задачи исследования

Цель проведенных исследований – синтез системы автоматического симметрирования токов асинхронного двигателя с применением тиристорного преобразователя напряжения, определение показателей симметрирования, разработка рекомендации по применению системы автоматического симметрирования.

Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

- разработка методов исследования несимметричных режимов работы электропривода ТПН–АД;
- определение влияния источника питания с несимметричным трехфазным напряжением на работу асинхронного двигателя;
- синтез функциональной схемы и математическое описание системы автоматического симметрирования;
- формирование результатов симметрирования токов АД и их анализ.

4. Материалы и методы исследования несимметричных режимов работы асинхронных двигателей

4.1. Экспериментальная база исследования

Исследование режимов симметрирования выполнялось как путем моделирования САС, так и при помощи ее физической модели. При моделировании применялась полная модель АД с учетом нелинейности его параметров с последующим моделированием ТПН на основании логических коммутационных функций [12]. Для задания несимметрии сети был разработан блок формирования нелинейного напряжения источника питания с возможностью варьирования коэффициента нелинейности. Оценка результатов симметрирования производилась на основании гармонического анализа токов статора АД.

При экспериментальном исследовании применялась физическая модель системы автоматического симметрирования, выполненная авторами на основе устройства плавного пуска (ТПН) MOELLER DS4 и асинхронного короткозамкнутого двигателя 4A90L4 2,2 кВт, 1500 об/мин (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид экспериментальной САС

При проведении эксперимента использовались КИУ и другая лабораторная база кафедры электро-механических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета (Украина).

4.2. Методы исследования несимметричных режимов работы электропривода ТПН-АД

Анализ несимметричных режимов в трехфазных электрических цепях предусматривает применение метода симметричных составляющих [13]. Он основан на пред-

ставлении трехфазной несимметричной системы в виде суммы трех симметричных величин – симметричных составляющих данной системы. Составляющие характеризуются различными последовательностями чередования фаз [3, 13]: системы прямой последовательности (\vec{U}_1, \vec{I}_1) ; системы обратной последовательности (\vec{U}_2, \vec{I}_2) ; системы нулевой последовательности (\vec{U}_0, \vec{I}_0) .

При исследовании свойств ЭП предполагается, что: параметры АД являются симметричными; СИФУ и ТПН симметричны; обмотки двигателя соединены в звезду без нулевого провода; показатели качества источника питания, исключая несимметрию напряжения, соответствуют нормам и не оказывают влияния на работу ЭП. Связь величин несимметричной системы и симметричных составляющих определяется на основании зависимостей (1) и (2).

$$\left. \begin{aligned} \vec{G}_0 &= (\vec{G}_a + \vec{G}_b + \vec{G}_c) / 3, \\ \vec{G}_1 &= (\vec{G}_a + a\vec{G}_b + a^2\vec{G}_c) / 3, \\ \vec{G}_2 &= (\vec{G}_a + a^2\vec{G}_b + a\vec{G}_c) / 3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{G}_a &= \vec{G}_0 + \vec{G}_1 + \vec{G}_2, \\ \vec{G}_b &= \vec{G}_0 + a^2\vec{G}_1 + a\vec{G}_2, \\ \vec{G}_c &= \vec{G}_0 + a\vec{G}_1 + a^2\vec{G}_2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где \vec{G} – вектор рассматриваемой переменной (\vec{U}, \vec{I}) ; $a = e^{j2\pi/3}$ – фазный множитель (оператор поворота).

Несимметрия напряжения трехфазного ИП характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения – K_u , который также известен в литературе как коэффициент обратной последовательности напряжения. Он определяется отношением напряжения обратной последовательности к номинальному напряжению и выражается в процентах [2]

$$K_u = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (3)$$

Относительное значение напряжения нулевой последовательности выражается коэффициентом нулевой последовательности напряжения K_{u0} , %, и определяется отношением напряжения нулевой последовательности основной частоты к номинальному фазному напряжению

$$K_{u0} = \frac{U_0}{U_{ном\phi}} \cdot 100. \quad (4)$$

По аналогии с напряжением источника питания, трехфазную систему фазных токов АД возможно разложить на системы прямой, обратной и нулевой последовательности, а также охарактеризовать коэффициентами

$$K_i = \frac{I_2}{I_1}, \quad (5)$$

$$K_{i0} = \frac{I_0}{I_1}, \quad (6)$$

где I_1 – ток системы прямой последовательности.

В соответствии с треугольником линейных напряжений, показанном на рис. 2, *a*, где *A*, *B*, *C* – вершины и *a*, *b*, *c* – стороны треугольника, согласно теореме косинусов [14]

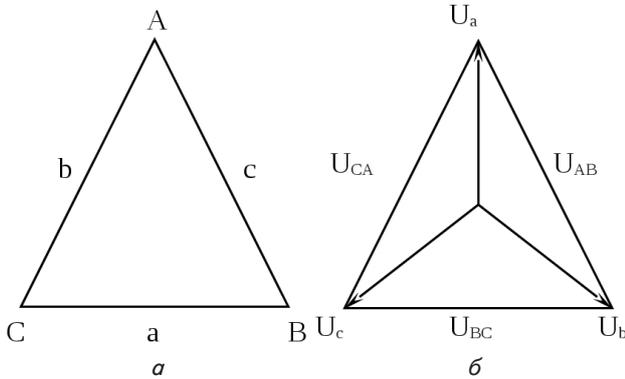


Рис. 2. Треугольники линейных напряжений: *a* – вспомогательный треугольник; *б* – треугольник напряжений

$$\left. \begin{aligned} \cos A &= \frac{(b^2 + c^2 - a^2)}{2bc} = \frac{(U_{CA}^2 + U_{AB}^2 - U_{BC}^2)}{2U_{CA}U_{AB}}, \\ \cos B &= \frac{(a^2 + c^2 - b^2)}{2ac} = \frac{(U_{BC}^2 + U_{AB}^2 - U_{CA}^2)}{2U_{BC}U_{AB}}, \\ \cos C &= \frac{(a^2 + b^2 - c^2)}{2ab} = \frac{(U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - U_{AB}^2)}{2U_{BC}U_{CA}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При известных значениях линейных напряжений источника питания ($U_{AB}=c$, $U_{BC}=a$, $U_{CA}=b$) по выражениям (8), (9) можно определять фазные напряжения (U_a , U_b , U_c) и напряжения прямой (U_1) и обратной (U_2) последовательностей

$$\left. \begin{aligned} U_a &= \frac{2}{3} \sqrt{c^2 + \frac{a^2}{4} - a \cdot c \cdot \cos B} = \frac{2}{3} \sqrt{U_{AB}^2 + \frac{U_{BC}^2}{4} - U_{BC}U_{AB} \cos B}, \\ U_b &= \frac{2}{3} \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{4} - a \cdot b \cdot \cos C} = \frac{2}{3} \sqrt{U_{BC}^2 + \frac{U_{CA}^2}{4} - U_{BC}U_{CA} \cos C}, \\ U_c &= \frac{2}{3} \sqrt{b^2 + \frac{c^2}{4} - b \cdot c \cdot \cos A} = \frac{2}{3} \sqrt{U_{CA}^2 + \frac{U_{AB}^2}{4} - U_{CA}U_{AB} \cos A}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{\sqrt{(a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos(B + \pi/3))}}{3} = \frac{\sqrt{(U_{BC}^2 + U_{AB}^2 - 2U_{BC}U_{AB} \cdot \cos(B + \pi/3))}}{3}, \\ U_2 &= \frac{\sqrt{(a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos(B - \pi/3))}}{3} = \frac{\sqrt{(U_{BC}^2 + U_{AB}^2 - 2U_{BC}U_{AB} \cdot \cos(B - \pi/3))}}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При несимметрии напряжения ИП, подводимого к ЭП, система фазных напряжений в общем виде может быть выражена

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \sqrt{2}U_a \sin(\omega_0 t + \phi_{fa}), \\ u_b &= \sqrt{2}U_b \sin(\omega_0 t + \phi_{fa} + \phi_{fb}), \\ u_c &= \sqrt{2}U_c \sin(\omega_0 t + \phi_{fa} + \phi_{fc}), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где ϕ_{fa} – фазовый угол сдвига вектора \vec{u}_a ; ϕ_{fb} – фазовый угол сдвига, на который вектор \vec{u}_b опережает \vec{u}_a ; ϕ_{fc} – фазовый угол сдвига, на который вектор \vec{u}_c опережает вектор \vec{u}_a .

Если условно принять, что фаза вектора напряжения U_a равна нулю (рис. 3), то углы сдвига фаз между векторами фазных напряжений (ϕ_{fb} , ϕ_{fc}) относительно фазы *A*, а также линейных (ϕ_{L1} , ϕ_{L2} , ϕ_{L3}) напряжений, определяются на основании выражений (11)–(13).

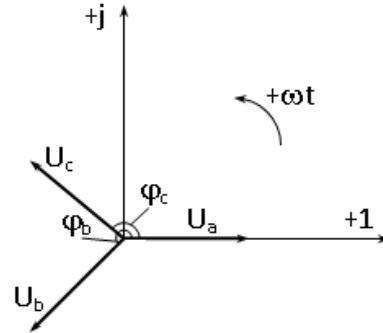


Рис. 3. Векторная диаграмма фазных напряжений с указанием принятых углов сдвига фаз

$$\left. \begin{aligned} \phi_{fc} &= \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{k_1}{\sqrt{1-k_1^2}}\right), \\ \phi_{fb} &= \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{k_2}{\sqrt{1-k_2^2}}\right) + \phi_f. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_{L1} &= \pi - \angle B, \\ \phi_{L2} &= \pi - \angle C, \\ \phi_{L3} &= \pi - \angle A. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь k_1, k_2 – расчетные коэффициенты,

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{U_{CA}^2 + U_a^2 - U_{BC}^2}{2U_a U_b}, \\ k_2 &= \frac{U_b^2 + U_c^2 - U_{BC}^2}{2U_b U_c}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В процессе формирования несимметричного напряжения ИП возникает проблема, связанная с неоднозначной зависимостью линейных напряжений и коэффициентов несимметрии напряжения K_u . Одному сочетанию значений линейных напряжений соответствует только одно значение коэффициента K_u , однако заданному значению коэффициента несимметрии соответствует множество сочетаний линейных напряжений.

Для решения этой проблемы предлагается рассматривать вариант несимметрии, при котором одно из линейных напряжений (U_{BC}) не изменяется и равно номинальной величине, тогда как два других (U_{CA} , U_{AB}) равны между собой и изменяются. Вместе с тем предполагается, что свойства двигателя при заданном K_u будут одинаковы, независимо от того, каким

способом формируется несимметрия [15]. На рис. 4 изображена зависимость коэффициента несимметрии напряжения K_u от изменения относительных значений линейных напряжений $U_{CA}^* = U_{AB}^*$. Этот график позволяет планировать диапазон коэффициента K_u , принятый для исследования в зависимости от возможных изменений напряжения ИП.

При исследовании влияния несимметрии напряжения ИП на электропривод ТПН-АД возникает необходимость учета несинусоидальности формы токов статора АД, обусловленную влиянием ТПН (рис. 5).

Это определяет необходимость выполнять гармонический анализ токов. Расчет несимметрии токов с учетом их несинусоидальной формы возможно провести, определив векторы первой гармоники прямой и обратной составляющих токов $\vec{I}_{11}, \vec{I}_{12}$. Для этого необходимо найти коэффициенты ряда Фурье из равенства [14]

$$\int_0^{2\pi} i_{\xi}(\omega t) d(\omega t) = \int_a^{2\pi+a} i_{\xi}(\omega t) d(\omega t) = 0, \tag{14}$$

где ξ – индекс фазы статора АД, a – действительное число.

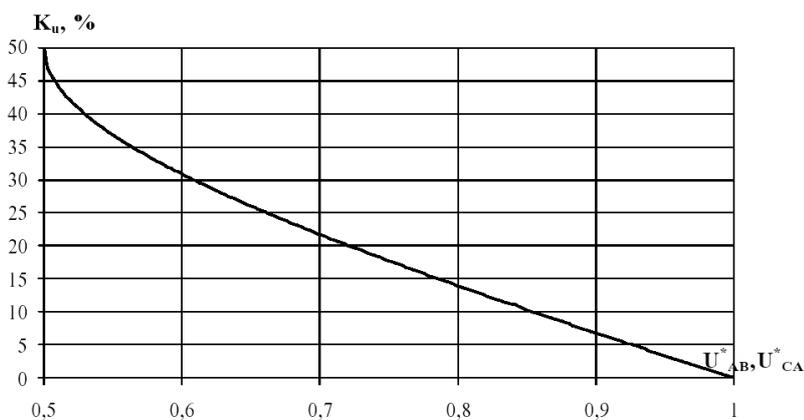


Рис. 4. Зависимость коэффициента несимметрии напряжения от изменения относительных значений линейных напряжений $U_{CA}^* = U_{AB}^*$

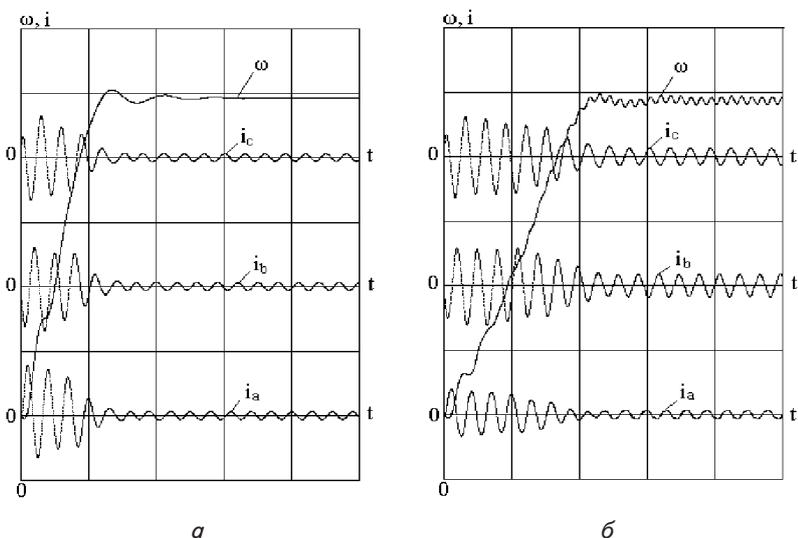


Рис. 5. Графики скорости и токов статора двигателя 4A90L4 при пуске в: а – симметричном режиме ($K_u=0$; $J_{\Sigma}=2J_{дв}$, $M_c=0,25M_n$, $\alpha=40$ эл. град); б – несимметричном режиме ($K_u=20\%$; $J_{\Sigma}=2J_{дв}$, $M_c=0,25M_n$, $\alpha=40$ эл. град). Масштабы: $m_i=6I_n/\text{дел.}$, $m_{\omega}=0,2 \omega_0/\text{дел.}$, $m_t=0,06 \text{ с}/\text{дел}$

Коэффициенты ряда Фурье первой гармоники токов АД определяются [12]

$$\left. \begin{aligned} a_{i_{\xi}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{\xi}(T) \cos(T) d(T) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N \int_{(i-1)h}^{ih} i_{\xi}(T) \cos(T) d(T), \\ b_{i_{\xi}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{\xi}(T) \sin(T) d(T) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N \int_{(i-1)h}^{ih} i_{\xi}(T) \sin(T) d(T), \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

где h – шаг расчета, $N=2\pi/h$ – общее количество расчетных значений.

С помощью метода трапеции – численного метода решения определенных интегралов, возможен переход [14]

$$\left. \begin{aligned} a_{i_{\xi}} &= \sum_{i=1}^N \frac{i_{\xi}(T_i) \cos(T_i) + i_{\xi}(T_{i-1}) \cos(T_i - h)}{N}, \\ b_{i_{\xi}} &= \sum_{i=1}^N \frac{i_{\xi}(T_i) \sin(T_i) + i_{\xi}(T_{i-1}) \sin(T_i - h)}{N}. \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

Модули первой гармоники токов статора АД определяются через известные коэффициенты ряда Фурье

$$I_{1m_{\xi}} = \sqrt{a_{i_{\xi}}^2 + b_{i_{\xi}}^2}. \tag{17}$$

Если допустить, что вектор \vec{I}_{1A} совпадает с действительной осью координат то, по аналогии с векторной системой напряжений (рис. 3), можно записать

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_{1A} &= \vec{I}_{1m_A}, \\ \vec{I}_{1B} &= \vec{I}_{1m_B} e^{j\phi_2}, \\ \vec{I}_{1C} &= \vec{I}_{1m_C} e^{j\phi_3}, \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

где $\phi_2 = \psi_{1B} - \psi_{1A}$ – угол сдвига между векторами \vec{I}_{1A} и \vec{I}_{1B} , $\phi_3 = \psi_{1C} - \psi_{1A}$ – угол сдвига между векторами \vec{I}_{1A} и \vec{I}_{1C} .

Используя векторные выражения составляющих прямой и обратной последовательностей токов первой гармоники определяются

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_{11} &= \frac{(\vec{I}_{1A} + a\vec{I}_{1B} + a^2\vec{I}_{1C})}{3}, \\ \vec{I}_{12} &= \frac{(\vec{I}_{1A} + a^2\vec{I}_{1B} + a\vec{I}_{1C})}{3}. \end{aligned} \right\} \tag{19}$$

Модули векторов составляющих прямой и обратной последовательностей токов первой гармоники определяются по их проекциям на ось действительных и мнимых чисел

$$\left. \begin{aligned} I_{11} &= \sqrt{[\text{Re}(\vec{I}_{11})]^2 + [\text{Im}(\vec{I}_{11})]^2}, \\ I_{12} &= \sqrt{[\text{Re}(\vec{I}_{12})]^2 + [\text{Im}(\vec{I}_{12})]^2}. \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

Проекции определяются из выражения (19)

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\bar{I}_{11}) &= \left[I_{1mA} + I_{1mB} \cos\left(\phi_2 + \frac{2\pi}{3}\right) + I_{1mC} \cos\left(\phi_3 + \frac{4\pi}{3}\right) \right] / 3, \\ \operatorname{Im}(\bar{I}_{11}) &= \left[I_{1mB} \sin\left(\phi_2 + \frac{2\pi}{3}\right) + I_{1mC} \sin\left(\phi_3 + \frac{4\pi}{3}\right) \right] / 3, \\ \operatorname{Re}(\bar{I}_{12}) &= \left[I_{1mA} + I_{1mB} \cos\left(\phi_2 + \frac{4\pi}{3}\right) + I_{1mC} \cos\left(\phi_3 + \frac{2\pi}{3}\right) \right] / 3, \\ \operatorname{Im}(\bar{I}_{12}) &= \left[I_{1mB} \cos\left(\phi_2 + \frac{4\pi}{3}\right) + I_{1mC} \cos\left(\phi_3 + \frac{2\pi}{3}\right) \right] / 3. \end{aligned} \right\} (21)$$

А коэффициенты несимметрии первой гармоники токов АД можно определить

$$K_i = \frac{I_{12}}{I_{11}} = \frac{\sqrt{[\operatorname{Re}(\bar{I}_{12})]^2 + [\operatorname{Im}(\bar{I}_{12})]^2}}{\sqrt{[\operatorname{Re}(\bar{I}_{11})]^2 + [\operatorname{Im}(\bar{I}_{11})]^2}}. \quad (22)$$

Численные значения коэффициентов несимметрии первой гармоники токов (22) позволяют количественно оценить симметричность трехфазной системы токов статора произвольного асинхронного двигателя.

5. Результаты исследования несимметричных режимов работы АД, синтез САС и результаты режимов симметрирования

В процессе исследования может возникнуть проблема, связанная с невозможностью определения коэффициентов несимметрии токов АД для всех режимов работы разомкнутой системы электропривода ТПН-АД. Ограничения по применению методики, изложенной в п. 4.2 накладываются, когда двигатель входит в специфический режим автоколебаний [16, 17]. При наличии колебаний скорости токи статора АД становятся несимметричными относительно нуля, а в ряде случаев и не периодичными. Вследствие этого, теряет смысл гармонический анализ токов, а значения коэффициентов несимметрии токов некорректны. Для избежания этого при проведении эксперимента обязательным является проверка на наличие колебаний скорости в установившихся режимах работы.

Для описания зависимости коэффициентов несимметрии токов от скольжения ротора АД используется метод наложения симметричных составляющих прямой и обратной последовательности напряжений

$$K_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2 Z_{\sigma 1}}{U_1 Z_{\sigma 2}} = K_u \frac{Z_{\sigma 1}}{Z_{\sigma 2}}, \quad (23)$$

где $Z_{\sigma 1}$, $Z_{\sigma 2}$ – эквивалентные сопротивления АД токам прямой и обратной последовательности.

При допущении о линейности параметров АД эквивалентные сопротивления определяются по выражениям

$$\left. \begin{aligned} Z_{\sigma 1} &= \sqrt{\left(c \cdot X_1 + c^2 \cdot X_2' \right)^2 + \left(c \cdot R_1 + \frac{c^2 \cdot R_2'}{s} \right)^2}, \\ Z_{\sigma 2} &= \sqrt{\left(c \cdot X_1 + c^2 \cdot X_2' \right)^2 + \left(c \cdot R_1 + \frac{c^2 \cdot R_2'}{2-s} \right)^2}, \end{aligned} \right\} (24)$$

где

$$c = 1 + \frac{Z_1}{Z_\mu} = 1 + \frac{Z_1}{Z_\mu}.$$

На рис. 6 изображены зависимости $K_i=f(s)$, рассчитанные по линейному выражению (23) для некоторых значений K_u в диапазоне рабочих скольжений АД $0 \leq s \leq 1$. Очевидно, что коэффициенты несимметрии напряжения и токов равны между собой только при условии равенства скольжения единице (в частности, в режиме короткого замыкания). При уменьшении скольжения результирующее сопротивление $Z_{\sigma 1}$ увеличивается, тогда как $Z_{\sigma 2}$ практически не изменяется. Это приводит к увеличению коэффициента несимметрии токов до значений $K_i > K_u$. Из рис. 6 следует, что на рабочем участке механической характеристики АД (в установившемся режиме) должно ожидать значительное увеличение коэффициента несимметрии токов АД $K_i \gg 1$, а при скольжении равно нулю коэффициент K_i должен стремиться в бесконечность.

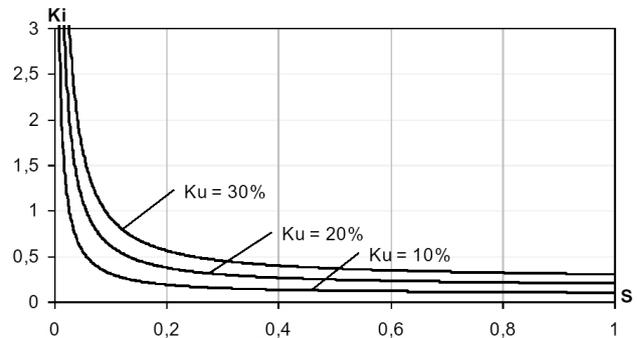


Рис. 6. Расчетные зависимости коэффициентов несимметрии токов от скольжения АД при несимметричном питании ЭП ТПН-АД

Моделирование электропривода ТПН-АД с учетом нелинейностей двигателя дает возможность оценить реальное влияние рабочего скольжения на величину коэффициента K_i в диапазоне скольжений $0 < s < s_n$ [12]. На рис. 7 приведены зависимости, полученные при помощи линейной и нелинейной моделей АД. Они сняты при отсутствии влияния тиристорного преобразователя ($\alpha=0$), при значениях $K_u=10\%$ и отсутствии нагрузки. Кривая, полученная на нелинейной модели, характеризуются конечным максимальным значением коэффициента несимметрии токов. Это значение равно $K_i=1,43$. В точке $s=s_n$ зависимость, рассчитанная на линейной модели, приближается к зависимости, полученной при учете нелинейностей АД.

Зависимости коэффициентов несимметрии токов от коэффициентов несимметрии напряжения в разомкнутых системах электропривода ТПН-АД приведены на рис. 8.

Зависимости даны для нескольких углов управления, при одинаковой нагрузке, определяемой моментом $M_c=0,7M_n$. Для обеспечения устойчивой работы электропривода суммарный момент инерции принят равным $J_\Sigma=2J_{дв}$. При коэффициенте несимметрии напряжения ИП равно нулю, что соответствует симметричной системе напряжений, токи статора АД

симметричны, а коэффициенты несимметрии тока АД равны нулю. При одинаковых коэффициентах несимметрии напряжения ИП максимальные значения K_i наблюдаются при отсутствии влияния ТПН ($\alpha=0$). В свою очередь, при питании двигателя от ТПН и увеличении углов управления, значения K_i уменьшаются. Это явление можно объяснить увеличением скольжений АД и отметить как влияние, которое оказывает работа тиристорного преобразователя на несимметрию токов АД. Увеличение коэффициентов несимметрии токов связано с увеличением K_u , причем максимальное значение коэффициента несимметрии токов принимает в случае максимального K_u , равного 20 % для случая $\alpha=0$. Это значение для исследуемого АД не превышает 0,943.

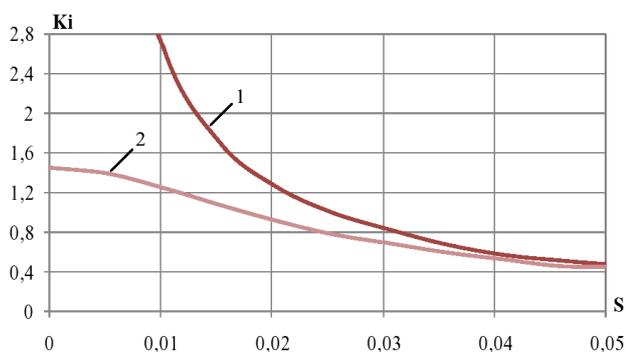


Рис. 7. Зависимости коэффициентов несимметрии токов от скольжения при несимметричном питании ЭП, полученные при помощи: 1 – линейной модели АД; 2 – нелинейной модели АД. Параметры: $K_u=10\%$, $\alpha=0$ эл. град., $J_{\Sigma}=2J_{дв}$

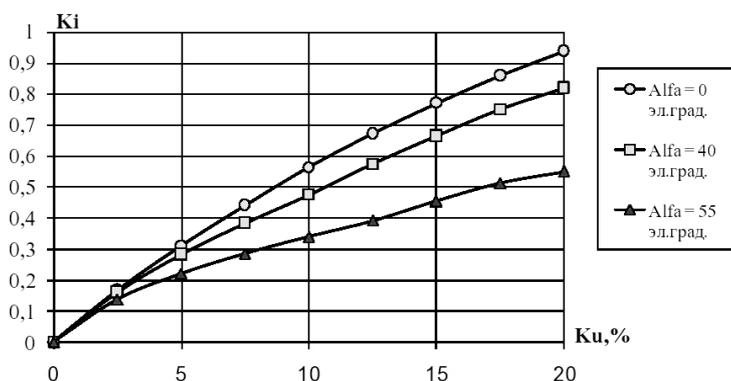


Рис. 8. Зависимости коэффициентов несимметрии токов от коэффициентов несимметрии напряжения в разомкнутой системе ЭП ТПН-АД при углах управления: $\alpha=0$, $\alpha=40$ и $\alpha=60$ эл. град.; $M_c=0,7M_n$

Характерно влияние несимметрии на динамику АД (рис. 5). Момент и скорость АД имеют колебательный характер с частотой 100 Гц. Увеличение величины несимметрии напряжения увеличивает длительность переходных процессов АД. Для подтверждения этого в табл. 2 приведена экспериментальная зависимость времени разгона асинхронного двигателя 4А90Л4 от величины коэффициента несимметрии напряжения для случая: $M_c=0,75M_n$, $\alpha=0$ эл. град., $J_{\Sigma}=2J_{дв}$.

При несимметрии напряжения ИП значения действующих токов статора в каждой из фаз АД различ-

ны. При номинальных моментах нагрузки в одной фазе (двух фазах) АД значения действующих токов превышают номинальную величину. Это характерно для всех типов АД. Например, для АД 4А90Л4 значения действующих токов статора при номинальном моменте $M_c=M_n$ и несимметрии напряжения, определяемой коэффициентами $K_u=5\%$ и $K_u=10\%$, приведены в табл. 3.

Таблица 2

Зависимость времени разгона АД от величины несимметрии напряжения ИП

$K_u, \%$	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
$t_{раз}, c$	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,24	0,32

Таблица 3

Значения действующих токов статора АД при несимметрии напряжения ИП

$K_u=5\%$			$K_u=10\%$		
I_a	I_b	I_c	I_a	I_b	I_c
$0,852 I_n$	$1,253 I_n$	$1,062 I_n$	$0,763 I_n$	$1,524 I_n$	$1,173 I_n$

Очевидно, что это недопустимо для эксплуатации двигателей по условиям нагрева. Данное обстоятельство накладывает ограничение на применение АД при несимметричном питании ЭП в широком диапазоне нагрузок. В табл. 4 для некоторых коэффициентов несимметрии напряжения источника питания приведены значения допустимых моментов нагрузки, при которых возможна работа АД при условии, что ни один из токов статора АД не превышает номинального значения (ограничение по условию нагрева). Для двигателей одного исполнения проблема несимметрии наиболее актуальна для более мощных АД, что обусловлено большими значениями коэффициентов несимметрии токов. Однако для двигателей разного исполнения и типоразмеров это утверждение не всегда верно. Это объясняется существенным влиянием параметров и рабочих скольжений АД, которые индивидуальны для каждого из двигателей.

Таблица 4

Допустимые моменты нагрузки АД при несимметрии напряжения ИП

K_u	M_c
2,5 %	0...0,88 M_n
5 %	0...0,76 M_n
10 %	0...0,53 M_n
15 %	0...0,29 M_n

Система автоматического симметрирования предназначена для уменьшения несимметрии токов АД, вызванной несимметрией напряжения ИП. Принцип симметрирования заключается в создании искусственной несимметрии тиристорного преобразователя напряжения, позволяющей скомпенсировать несимметрию ИП. Условием создания САС является необходимость применения нескольких каналов управления и обратных связей при наличии одного задающего сиг-

нала управления. Причем управляющее воздействие не является константой, а должно зависеть от текущей нагрузки на валу АД. Так как тиристор является дискретным устройством, мгновенные значения токов статора АД не информативны и не могут быть сигналами обратной связи (ОС). Сигналами ОС в данном случае являются значения действующих токов статора АД, измеряемые не меньше чем за половину периода напряжения ИП. Это обуславливает применение в САС трех каналов управления и обратной связи – по каналу в каждой из фаз двигателя. Функциональная схема предлагаемой САС показана на рис. 9. В ее состав входят: ФЗ – формирователь задающего воздействия; КУФА (КУФВ, КУФС) – каналы управления фазой А, В и С, соответственно; ТПН – тиристорный преобразователь напряжения; АД – асинхронный двигатель; КОСФА (КОСФВ, КОСФС) – каналы обратной связи фаз А, В и С, соответственно. Формирователь задающего воздействия формирует сигнал управления в функции сигналов ОС, который изменяется один раз на протяжении полупериода напряжения ИП, и равняется одной трети суммы напряжений обратной связи каналов фаз А, В и С. Канал обратной связи каждой из фаз (КОСФА, КОСФВ, КОСФС) включает (рис. 10):

– ДТ – датчик тока, преобразующий мгновенные значения тока статора АД в мгновенные значения напряжения, поступающие на ЭВДЗ [18] (ЭВДЗ – элемент вычисления значения действующего тока статора АД за половину периода напряжения источника питания);

– ЭлП – элемент памяти, хранящий значение напряжения обратной связи, значение которого обновляется через интервал времени, равный половине периода напряжения ИП.

Напряжение задания и напряжения обратной связи каждой из фаз поступают на сумматор и определяют разности сигналов $\Delta U_{zi} = U_{zi} - U_{oci}$, которые поступают на входы каналов управления фаз. Каналы управления фаз (КУФА, КУФВ, КУФС) состоят из регуляторов тока (РТ) и систем импульсно-фазового управления. В пропорционально-интегральном (ПИ) регуляторе сигнал на выходе пропорционален входному сигналу и интегралу от входного сигнала во времени. Пропорциональная (П) составляющая стабилизирует работу САС во время переходных процессов, тогда как интегральная обеспечивает астатизм в установившемся режиме работы [19]. В данном случае при пуске ЭлП нет необходимости в П – составляющей регулятора. Работа САС во время переходного процесса ограничивается естественным образом.

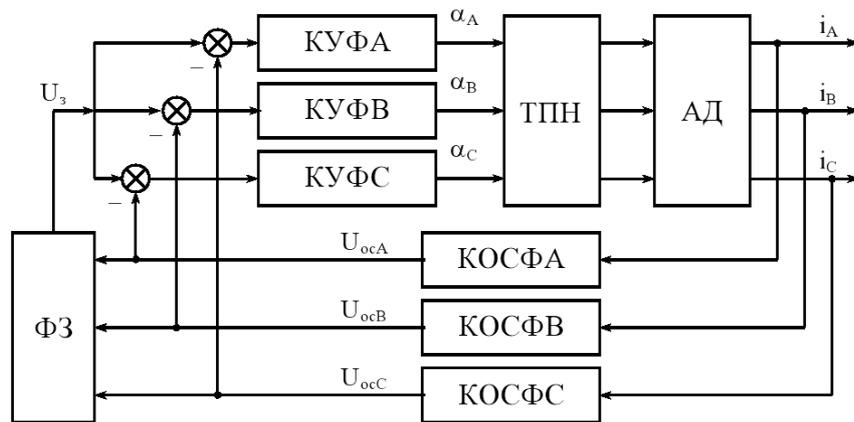


Рис. 9. Функциональная схема системы автоматического симметрирования токов статора АД

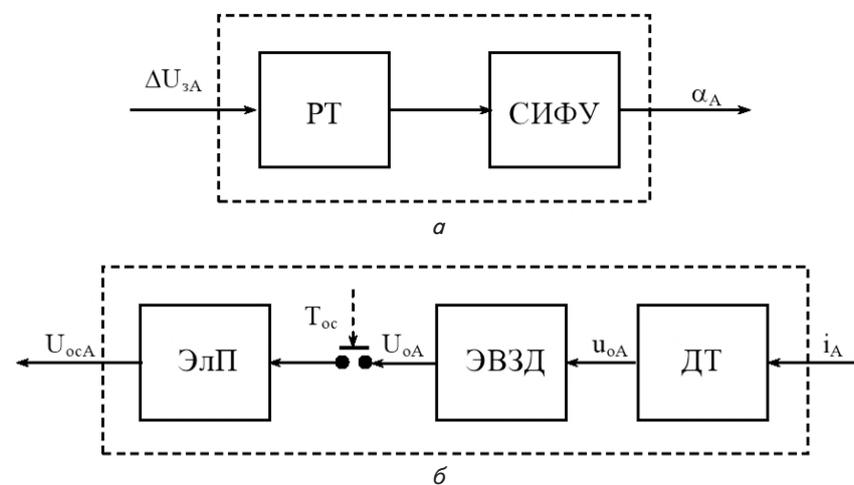


Рис. 10. Функциональные схемы: а – канала управления; б – канала обратной связи фазы А системы автоматического симметрирования токов АД

За счет больших значений токов АД сигналы U_3 и U_{oc} ограничены насыщением устройств САУ и равны максимальному значению 10 В, вследствие чего, поступающий на вход регулятора сигнал ΔU_{3A} равен нулю. Работа САС начинается по окончании переходного процесса, связанного с изменением скорости АД, тогда когда пусковые токи уменьшаются, а элементы САУ выходят из насыщения [20]. С момента начала работы САС необходимо обеспечить плавный рост сигнала на выходе регулятора с $U_p=0$ до $U_p=U_{p \max}$, что обеспечивается интегральной составляющей РТ. Для ряда условий пропорциональная составляющая приводит к чрезмерно быстрому возрастанию выходной величины регулятора и угла α одного канала или нескольких каналов, что определяет неустойчивую работу всей САС. Регуляторы тока описываются передаточной функцией [21]

$$H_{pr}(p) = \frac{R_s}{2 \cdot T_{cy} \cdot K_n \cdot K_{ocp}}, \quad (25)$$

где T_{cy} – суммарная постоянная времени системы управления, с; R_s – эквивалентное активное сопротивление объекта регулирования (АД), определяемое по схеме замещения, Ом; K_{oc} – коэффициент передачи канала обратной связи, В/с; K_n – коэффициент передачи ТПН рассчитывается как отношение первой

гармоники выходного напряжения к углу отпирания тиристоров U_1/α для системы с СН и U_1/γ для системы с СТ.

$$T_{cy} = T_{сифу} + T_{тпн} + T_{ос} = \frac{1}{2} \frac{T_c}{6} + \frac{1}{2} \frac{T_c}{6} + \frac{T_c}{2} = 0,0133 \text{ с.}, \quad (26)$$

где $T_c = 0,02$ – период напряжения источника питания, с.

Проблема корректного определения коэффициента передачи ТПН состоит в том, что U_1 изменяется в широких пределах в зависимости от значений угла управления α и текущих величин угла нагрузки АД ϕ . Для однозначности определения примем допущение, что преобразователь работает в верхнем пределе дограничного режима $\alpha = 90$ эл. град = $1,57$ эл. рад. с номинальным моментом нагрузки. Тогда для ТПН для данных условий коэффициент передачи ТПН $K_{пн} = 65,2$ В/рад [22].

Зависимость угла управления от управляющего напряжения выражается на основании выражения

$$\alpha = 0 - K_{сифу \alpha} U_{вых \text{ рт}}, \quad (27)$$

где $K_{сифу \alpha}$ – коэффициент передачи СИФУ

$$K_{сифу \alpha} = \frac{\alpha_{\text{макс}}}{U_{\text{вых \text{ рт} \text{ макс}}}} = \frac{120}{10} = 12 \frac{\text{рад}}{\text{В}}. \quad (28)$$

Значение коэффициента передачи канала обратной связи

$$K_{ос} = \frac{U_{о \text{ макс}}}{I_{\text{макс}}} = \frac{U_{ос \text{ макс}}}{2 \cdot I_{пн}} = \frac{10}{2 \cdot 5,02} = 0,996 \frac{\text{В}}{\text{А}}. \quad (29)$$

Для обеспечения повышенного быстродействия САС необходимо применять адаптивные регуляторы тока, параметры которых изменяются в каждый момент времени при текущем изменении эквивалентного активного сопротивления двигателя $R_{\text{э}}$. Применение регуляторов с фиксированными параметрами несколько уменьшает быстродействие САС, но значительно упрощает систему управления [23]. В данном случае регуляторы необходимо настраивать исходя из параметров АД при номинальном моменте нагрузки. Для исследуемого двигателя 4А90Л4 эквивалентное активное сопротивление при номинальном моменте составляет $R_{\text{э}} = R_{\text{эн}} = 36,4$ Ом, передаточная функция регулятора тока принимает вид

$$H_{\text{рт \text{ сн}}}(p) = \frac{21,1}{p}. \quad (30)$$

Особенностью описанной САУ является непрерывная работа каналов управления при том условии, что информация об ошибках рассогласования напряжения задания и напряжений обратной связи обновляется один раз за полпериода напряжения ИП. Возможна иная реализация САУ, которую можно охарактеризовать как систему дискретного действия каналов управления (рис. 11).

В данном случае и каналы ОС и каналы управления формируют значения величин один раз за половину периода напряжения ИП. С выхода регулятора тока на вход СИФУ поступает сигнал пропорциональный приращению $\Delta\alpha$ ($\Delta\gamma$) [19]. Он корректирует значение угла управления, которое определяло работу тиристоров в предыдущий полупериод напряжения ИП. Предполагается применение цифровых П – регуляторов тока и СИФУ, в состав каждой из которых входят:

– БП – блок преобразования, который описывается зависимостью

$$\Delta\alpha = K_{сифу \alpha} \Delta U_{\text{вых \text{ рт}}}, \quad (31)$$

– БКр – блок коррекции, где реализуется формирование угла α , которое будет определять работу тиристора в данной фазе в текущий полупериод напряжения ИП. Блок коррекции описывается выражением

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} - \Delta\alpha_i. \quad (32)$$

Также, в каждую из СИФУ входят два элемента памяти – ЭлП1 и ЭлП2, предназначенные для хранения значений напряжений управления, пропорциональных предыдущему и текущему значению α . При данной реализации САС отсутствует необходимость в применении элементов памяти в каналах обратной связи. К недостатку этой системы можно отнести наличие статической ошибки и принципиальную невозможность уменьшения значений коэффициентов несимметрии токов АД до нуля.

При анализе работы система автоматического симметрирования токов АД производился пуск двигателя с определенным показателем несимметрии напряжения ИП, определялись необходимые параметры, затем задействовалась САС и через интервал времени определялись результаты симметрирования. На рис. 12 приведены экспериментальные осциллограммы скорости и токов АД, иллюстрирующие режим симметрирования.

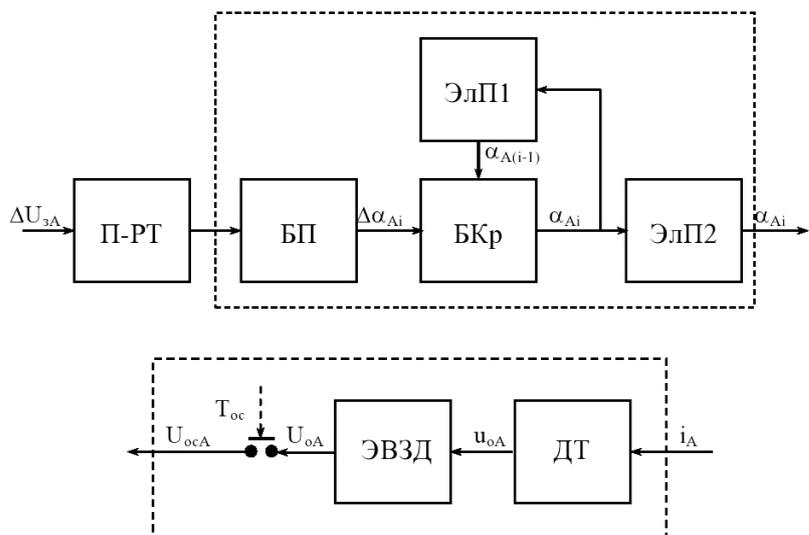


Рис. 11. Функциональные схемы канала управления и канала обратной связи одной из фаз САС при реализации системы управления дискретного действия

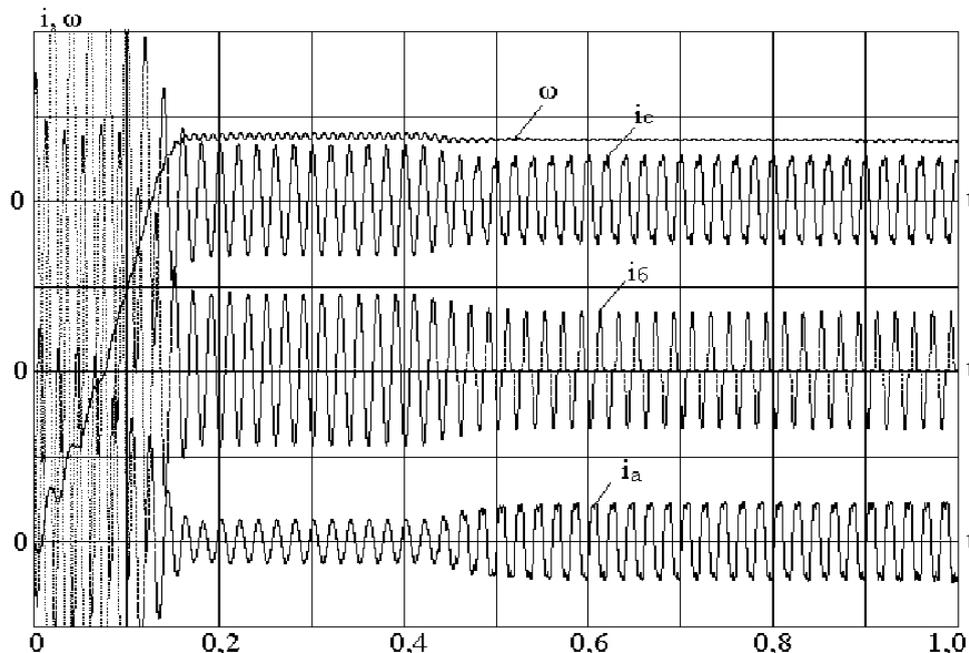


Рис. 12. Расчетные осциллограммы скорости и токов статора АД, иллюстрирующие процесс симметрирования

Осуществляется прямой пуск АД с суммарным моментом инерции $J_{\Sigma}=2J_{дв}$ и моментом нагрузки $M_c=0,6M_n$ при несимметрии ИП, характеризующейся коэффициентом $K_u=12,5\%$. До введения режима симметрирования наблюдаются значительные различия токов АД и колебание скорости, характерные для несимметричного режима работы. После разгона двигателя в момент времени $t=0,4$ с. система замыкается ОС, что приводит к существенному уменьшению влияния несимметрии ИП. При этом колебания скорости с частотой 100 герц при нагрузке на валу АД, определяемой моментами $0 \leq M \leq 0,3M_n$ значительно уменьшаются, а при моментах $0,3M_n \leq M \leq 0,9M_n$ полностью устраняются. На относительные результаты симметрирования не оказывает влияние то, с каким углом открывания тиристоры работала электропривод до замыкания обратной связи – то есть до начала процесса симметрирования. Гораздо значительнее влияние, которое оказывает величина нагрузки на валу двигателя.

Симметрирование с помощью САС приводит не только к определенному равенству действующих токов статора в фазах АД, но и позволяет существенно уменьшить эти значения относительно максимального тока, фиксировавшегося до начала режима симметрирования. Это позволяет существенно расширить допустимый по условию нагрева АД диапазон возможных рабочих моментов при несимметрии напряжения источника питания, что показано в табл. 5.

Степень приближения магнитного поля АД к круговому в процессе симметрирования возможно проиллюстрировать на примере годографов токов статора АД, построенных с помощью модели, в осях α, β (рис. 13, а–z) [12]. Выражения для перехода из трехфазной системы координат в двухфазную имеют вид

$$\left. \begin{aligned} I_{\alpha} &= \frac{2}{3}I_a - \frac{1}{3}(I_b + I_c), \\ I_{\beta} &= j\frac{1}{\sqrt{3}}(I_b - I_c), \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

где I_a, I_b, I_c – токи статора АД в естественных осях А, В, С.

Таблица 5

Допустимые по нагреву нагрузки асинхронного двигателя 4А90L4 при несимметрии напряжения источника питания

K_u	M_c до симметрирования	M_c после симметрирования
2,5 %	0...0,88 M_n	0...0,97 M_n
5 %	0...0,76 M_n	0...0,93 M_n
10 %	0...0,53 M_n	0...0,85 M_n
15 %	0...0,29 M_n	0...0,74 M_n

На рис. 13, а изображен годограф токов при симметрии напряжений ИП, регулирование ТПН отсутствует $\alpha=0$, момент нагрузки $M_c=0,5M_n$. На рис. 13, б условия работы те же, но величина угла управления преобразователя напряжения соответствует $\alpha=30$ эл. град. Рис. 13, в иллюстрирует годограф токов в АД при несимметричном напряжении ИП ($K_u=10\%$, $\alpha=0$) и на рис. 13, г показан годограф для тех же условий, но после симметрирования САС за время $t_{сим}=0,8$ с. Наглядно выражена тенденции «выравнивания» годографа и проявление работы преобразователя. При несимметрии напряжения ИП, определяемой коэффициентами $K_u \leq 15\%$ САС обеспечивает понижение значений коэффициентов несимметрии токов АД более чем на порядок. В табл. 6 приведены экспериментальные показатели симметрирования токов статора АД 4А90L4 при различных моментах нагрузки, при условии $\alpha_{нач}=0$ и времени симметрирования $t_{сим}=0,8$ с.

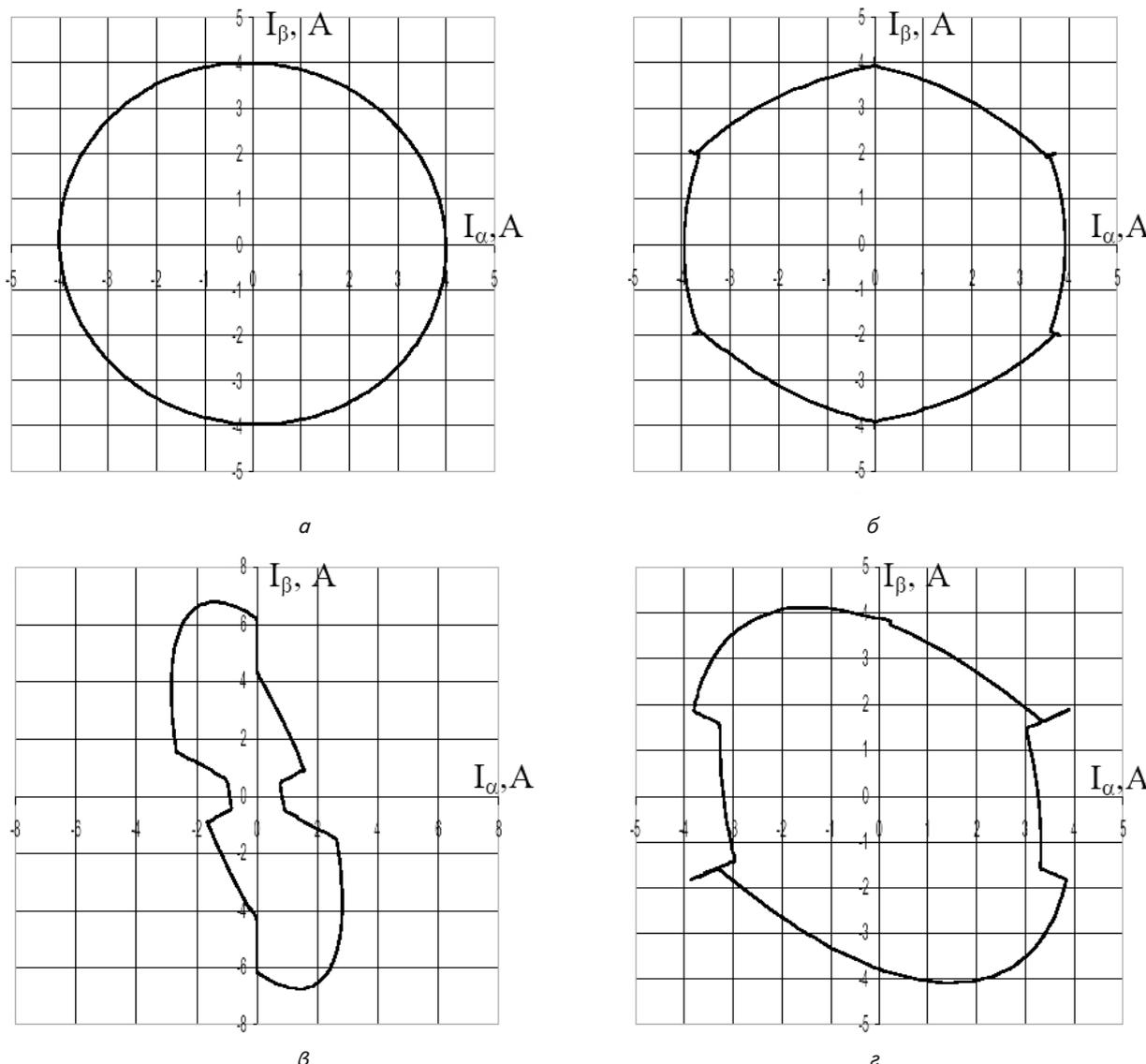


Рис. 13. Годографы токов статора АД в осях α, β для загрузки $M_c=0,5M_n$ и условий работы: $a - K_u=0, \alpha=0$; $б - K_u=0, \alpha=30$ эл. град; $в - K_u=10 \%, \alpha=0$; $г - K_u=10 \%, \alpha_{нач}=0, t_{сим}=0,8$ с

6. Обсуждение результатов симметрирования токов АД

При несимметрии напряжений ИП, определяемой коэффициентами $K_u < 6...7 \%$ проявляется хороший эффект симметрирования при любых моментах нагрузки.

При нагрузке

$$\frac{M_c}{M_n} = [0...0,2]$$

и несимметрии напряжения источника питания с $K_u > 7 \%$ эффект снижается. Это особенно наглядно проявляется при малых нагрузках АД и на холостом ходу. Работа и принципы управления САС при отсутствии нагрузки и в области малых моментов имеют приведенные ниже особенности.

– Накладываются естественные ограничения ТПН, по которым напряжение на выходе преобразователя принципиально не может превышать напряжение на входе. При значительной несимметрии напряжения ИП это снижает показатели симметрирования.

– Для некоторых типов АД, преимущественно малой мощности, при несимметрии источника питания с $K_u > 9...11 \%$ система проявляет признаки неустойчивости, что влечет за собой нарушение нормальной работы. Одним из способов решения данной пробле-

Таблица 6

Показатели симметрирования токов статора АД 4А90L4

M_c/M	$K_u=2,5 \%$		$K_u=5 \%$		$K_u=10 \%$		$K_u=15 \%$	
	K_{io}^*	$K_{i\text{САС}}^{**}$	K_{io}	$K_{i\text{САС}}$	K_{io}	$K_{i\text{САС}}$	K_{io}	$K_{i\text{САС}}$
0,9	0,13	0,006	0,249	0,007	×	×	×	×
0,7	0,17	0,003	0,314	0,009	0,591	0,023	0,831	0,024
0,5	0,21	0,030	0,411	0,010	0,767	0,028	1,127	0,026
0,3	0,28	0,027	0,539	0,045	1,083	0,046	1,600	0,060
0,1	0,32	0,027	0,649	0,037	1,398	0,651	2,216	0,962
0	0,32	0,065	0,658	0,095	1,456	0,994	2,339	1,291

Примечание: * – K_{io} – коэффициент несимметрии токов АД; ** – $K_{i\text{САС}}$ – коэффициент несимметрии токов АД в составе системы автоматического симметрирования; × – длительная работа САС по условию нагрева АД невозможна

мы является управление для этого режима работы только по одному каналу – каналу с максимальным действующим током статора АД, например каналу В. Угол управления СИФУ второго канала фиксируется равным углу третьего канала $\alpha_C = \alpha_A$. В этом случае уменьшается быстродействие САС и показатели симметрирования, однако сохраняется возможность реализаций функций режима симметрирования.

– Характерно преобладание режимов двухфазной проводимости, что затрудняет процесс симметрирования.

С увеличением нагрузки время симметрирования уменьшается. Быстродействие системы автоматического симметрирования при несимметрии, определяемой коэффициентом $K_u = 15\%$, и различных нагрузках на валу АД, иллюстрируют зависимости, приведенные на рис. 14.

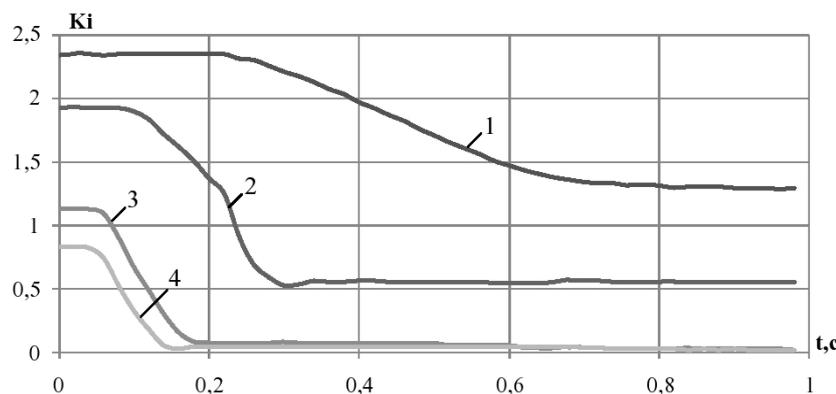


Рис. 14. Графики зависимости коэффициентов несимметрии токов АД во времени с начала процесса симметрирования: 1 – $M_c=0$; 2 – $M_c=0,2M_n$; 3 – $M_c=0,5M_n$; 4 – $M_c=0,7M_n$

Начальные углы управления равны нулю, что соответствует одному из предельных условий по обеспечению быстродействия. Время симметрирования существенно зависит от начальных углов включения ТПН, величины нагрузки АД и величины несимметрии напряжения ИП. При предельных условиях и фиксированных параметрах регуляторов тока быстродействие САС не превышает 1,5 секунд. В случае применения адаптивных регуляторов общее быстродействие может быть увеличено. Существование интервала времени, характеризующегося отсутствием режима симметрирования, может быть объяснено наличием зоны нечувствительности и отсутствием симметрирования при углах управления α меньших угла нагрузки $\varphi_{дв}$. Очевидно, что эта зона будет максимальной в режимах, близких к холостому ходу, когда $\varphi_{дв} \approx 90$ эл. град [6].

Отмечая прочие достоинства САС, следует отметить, что замыкание обратной связью приводит к устойчивости электропривода ТПН-АД. При исследовании не удалось зафиксировать ни одной рабочей точки, в которой бы наблюдались автоколебательные явления, свойственные неустойчивым разомкнутым системам ЭП ТПН-АД [16, 17]. Также САС позволяет существенно уменьшить потери мощности в АД, которые возрастают при работе электропривода от источника с несимметричным напряжением.

7. Выводы

1. Разработаны методы исследования несимметричных режимов работы электропривода ТПН-АД, а именно:

– математическое описание трехфазных несимметричных систем;

– определение условия формирования и расчет коэффициентов несимметрии напряжения источника питания и коэффициентов несимметрии токов АД;

– гармонический анализ токов асинхронного двигателя;

2. Определено влияние несимметрии источника питания на работу АД, так:

– несимметрия напряжения источника питания вызывает колебательный характер момента и скорости АД с частотой 100 Гц; приводит к увеличению длительности механических переходных процессов двигателя; обуславливает несимметрию токов АД;

– при несимметрии напряжения ИП и номинальных моментах нагрузки в одной или двух фазах двигателя значения действующих токов статора превышают номинальное значение, что уменьшает диапазон рабочих моментов по условию нагрева АД;

– несимметрия токов статора наиболее выражена при малых скольжениях АД, полностью открытых вентилях ТПН и в большей степени проявляется для двигателей средней и большой мощности.

3. Подтвержден принцип симметрирования токов АД, который заключается в создании искусственной

несимметрии ТПН, позволяющей скомпенсировать несимметрию ИП. Показано, что условием создания САС является необходимость применения нескольких каналов управления и обратных связей при наличии одного задающего сигнала управления, причем управляющее воздействие не является константой, а зависит от текущей нагрузки на валу АД. Формирователь задающего воздействия формирует сигнал управления в функции сигналов обратной связи, который изменяется один раз на протяжении полупериода напряжения ИП.

4. Проанализированы режимы работы предложенной системы автоматического симметрирования на примере асинхронного двигателя 4А90Л4 с тиристорным преобразователем напряжения. В процессе исследования определено, что:

– при коэффициентах несимметрии напряжения источника питания $K_u < 15\%$ работа САС приводит к уменьшению коэффициентов несимметрии токов более чем на порядок, что практически обуславливает равенство действующих токов статора в фазах асинхронного двигателя;

– имеет место устранение колебаний скорости (при $K_u < 10\%$, $0,3M_n < M < 0,9M_n$) или их значительно уменьшение;

– наблюдается значительное расширение диапазона возможных рабочих моментов АД по условию нагре-

ва (при $K_u=10\%$, до симметрирования – $0 < M < 0,53M_n$, после – $0 < M < 0,87M_n$);

– САС характеризуется достаточно высоким быстродействием, (соответствующее времени окончания процесса симметрирования не превышает 1...1,5 секунд);

– возможна компенсация несимметрии параметров АД, несимметрии СИФУ и ТПН;

– становится возможным устранение неустойчивых режимов работы, свойственных разомкнутым системам электропривода ТПН-АД с синхронизацией с напряжением сети.

Литература

1. Бабакин, В. И. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] / В. И. Бабакин. – Уфа: УГНТУ, 2007. – 224 с.
2. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. Пинчук, О. Г. Энергетические показатели асинхронного двигателя при различных параметрах несимметрии питающего напряжения [Текст] / О. Г. Пинчук // Електротехніка і енергетика. Наукові праці ДонНТУ. – 2008. – Вып. 8 (140). – С. 201–205.
4. Андриющенко, О. А. Электропривод ТПН-АД с автоматическим симметрированием токов статора [Текст] / О. А. Андриющенко, Лю Ким Тхань // Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 1995. – С. 136–137.
5. Браславский, И. Я. Опыт внедрения тиристорных асинхронных электроприводов с фазовым управлением [Текст] / И. Я. Браславский, А. М. Зюзев // Автоматизированный электропривод. – 1999. – № 3. – С. 47–57.
6. Braslavskij, I. Thyristor controlled asynchronous electrical drive without speed sensor [Text] / I. Braslavskij, A. Zyuzev, K. Nestorov // 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. – P. 1093–1096. doi: 10.1109/speedham.2008.4581098
7. Driesen, J. Введение в несимметричность [Text] / J. Driesen, T. Van; пер. с англ. // Энергосбережение. – 2004. – № 6. – С. 32–38.
8. Жежеленко, И. В. Надежность работы электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии [Текст]: сб. науч. пр. / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич, И. А. Швецова // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2005. – Вып. 15, Ч. 2. – С. 25–29.
9. Митяшин, Н. П. Модели чувствительности фазовых напряжений к изменению управляющих воздействий системы симметрирования напряжений автономной сети [Текст]: мезуз. науч. сб. / Н. П. Митяшин, В. А. Дерунов, Л. Ю. Арефьев // Проблемы энергетики. – 2005. – С. 99–106.
10. Филиппов, А. О. Экспериментальное исследование трансформаторного симметрирующего устройства [Текст] / А. О. Филиппов // Известия СПбГАУ. – 2010. – № 19. – С. 22–30.
11. Tremlin, R. Soft-Start drives [Text] / R. Tremlin // Wire Ind. – 2006. – Vol. 626. – P. 92–96.
12. Бойко, А. О. Моделирование системы ТПН-АД [Текст] / А. О. Бойко, А. А. Бересан // Математическое моделирование. – 2010. – С. 39–42.
13. Лоторейнук, Е. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Е. А. Лоторейнук. – М.: Форум, 2010. – 340 с.
14. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – М.: Астрель, 2006. – 994 с.
15. Андриющенко, О. А. Улучшение показателей асинхронного электропривода с автоматическим симметрированием токов при питании от источника с несимметричным напряжением [Текст] / О. А. Андриющенко, А. А. Бойко // Вісник національного технічного університету «ХПИ». – 2002. – Т. 1, Вып. 12. – С. 147–148.
16. Andryushchenko, O. Maple Software Applied for Stability Research of Electric Drive TVC-IM [Text] / O. Andryushchenko, A. Boyko // Simulation News Europe. – 2003. – Vol. 38/39. – P. 35–37.
17. Бойко, А. А. Ограничение неустойчивых режимов работы лифтовых подъемных механизмов с электроприводом ТПН-АД [Текст] / А. А. Бойко // Підійомно-транспортна техніка. – 2014. – Вып. 2 (42). – С. 36–45.
18. Будашко, В. В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу [Текст]: сб. науч. пр. / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2014. – № 38 (1081). – С. 45–51.
19. Vas, P. Control of AC Machines [Text] / P. Vas. – Oxford, Clarendon Press, 1990. – 98 p.
20. Buja, G. A new control strategy of the induction motor drives: the direct flux and torque control [Text] / G. Buja // IEEE Ind. Electron. Soc. Newsletter, 1998. – P. 14–16.
21. Радимов, С. Н. Системы управления с подчиненным регулированием координат электропривода [Текст] / С. Н. Радимов. – Одесса: ОПИ, 1983. – 83 с.
22. Глазева, О. В. Аспекти математичного моделювання елементів єдиних електроенергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів [Текст]: сб. науч. пр. / О. В. Глазева, В. В. Будашко // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2015. – № 42 (1151). – С. 71–75.
23. Prado, A. Phase-Mode Transformation Matrix Application for Transmission Line and Electromagnetic Transient Analyses [Text] / A. Prado, S. Kurokawa, L. Bovolato, J. Filho. – New York: Nova Science Pub Inc, 2011. – 40 p.