

УДК 62–83:621.313.333

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108545

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФУНКЦИЕЙ СИММЕТРИРОВАНИЯ ТОКОВ

А. А. Бойко, Я. Б. Волянская

СИНТЕЗ СИСТЕМИ МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФУНКЦІЄЮ СИМЕТРУВАННЯ СТРУМІВ

А. О. Бойко, Я. Б. Волянська

SYNTHESIS OF MINIMIZATION SYSTEM OF ASYNCHRONOUS MOTOR LOSS WITH SYNCHEMETRY URRENT OF CURRENTS

A. Boyko, Y. Volyanskaya

Виконаний математичний опис режимів роботи електропривода ТПН-АД, у яких можливе зменшення втрат потужності. Виконана розробка системи мінімізації втрат асинхронного двигуна. Наведена структурна схема, виконані розрахунки системи керування. Зазначені показники зменшення втрат і показники симетрування при живленні від джерела з несиметричною напругою. Ілюстровані особливості роботи системи та шляхи підвищення її ефективності

Ключові слова: асинхронний двигун, тиристорний перетворювач, електропривод, мінімізація втрат, несиметрія напруг, симетрування

Выполнено математическое описание режимов работы электропривода ТПН-АД, в которых возможно уменьшение потерь мощности. Выполнена разработка системы минимизации потерь асинхронного двигателя. Приведена структурная схема, выполнен расчет системы управления. Указаны показатели уменьшения потерь и показатели симметрирования при питании от источника с несимметричным напряжением. Иллюстрированы особенности работы системы и пути повышения ее эффективности

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь, электропривод, минимизация потерь, несимметрия напряжений, симметрирование

1. Введение

В настоящее время в мировой практике наблюдается тенденция, выраженная в увеличении массового производства и использования регулируемых электроприводов (ЭП) переменного тока. К началу 2000-х годов ведущие электротехнические компании прекратили либо значительно уменьшили объемы производства ЭП постоянного тока [1]. По данным в

экономически развитых странах от 80 % до 90 % от общего количества потребляемой ЭП электроэнергии приходится на электроприводы с асинхронными двигателями (АД), причем преимущественно с короткозамкнутым ротором. Это обусловлено их относительно невысокой стоимостью, меньшей, по сравнению с электрическими двигателями других типов потребности в дефицитных материалах, экономичностью, простотой и надежностью в эксплуатации. Применительно к асинхронным двигателям широко используются два класса ЭП – это электроприводы с тиристорными преобразователями напряжения (ТПН) и преобразователями частоты (ПЧ). Известны достоинства и недостатки обеих систем ЭП. Использование ЭП той или другой системы диктуется технико-экономическими требованиями механизмов к электроприводу.

Электроприводы ТПН-АД отличаются низкой стоимостью, простотой, хорошими массогабаритными показателями, высокой надежностью, обладают (особенно при использовании в замкнутых системах) широкими функциональными возможностями [2]. Анализ возможностей асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения показывает, что он может успешно конкурировать с частотными электроприводами. ТПН-АД характеризуется меньшими стоимостными показателями и может быть рекомендован в случаях, где не требуется длительная работа на скорости ниже номинальной. Несмотря на то, что история развития электроприводов ТПН-АД насчитывает более пятидесяти лет, нельзя говорить о том, что все научные проблемы решены и резервы технического совершенствования исчерпаны. Так, перспективной является решение задачи практической разработки систем и алгоритмов управления энергосберегающими режимами ТПН-АД. Актуальна также разработка электромеханических систем, направленных на компенсацию негативных свойств, связанных с ухудшением показателей качества источника питания.

2. Анализ литературы и постановка проблемы

Известно, что, несмотря на свои достоинства, АД имеет высокие энергетические показатели лишь при работе в номинальном режиме. Отклонения от номинального режима работы АД, связанные с уменьшением нагрузки, приводят к значительному ухудшению энергетических показателей двигателей [4]. Электропривод с тиристорным преобразователем напряжения позволяет решать указанную проблему. Речь идет о продолжительной работе на искусственных характеристиках в области номинального скольжения с потерями в асинхронных двигателях меньшими, чем на рабочем участке естественной характеристики [4, 5]. Управляющим воздействием является выходное напряжение преобразователя, а работа асинхронного двигателя происходит на оптимальной регулировочной механической характеристике [6]. Управление напряжением осуществляется вниз от номинального. Оптимальная характеристика рассчитывается исходя из решения задачи по экстремальному управлению согласно критерию минимума потерь мощности [7].

Исследования, выполненные авторами в [4-7] значительно решают

проблему теоретического обоснования оптимизации энергетических показателей асинхронных двигателей и синтеза энергосберегающих систем управления. Однако предлагаемые электромеханические системы разработаны и рекомендованы к использованию при нормированных показателях качества напряжения источника питания и совершенно инвариантны их изменению. Работа подобных систем в условиях несимметрии напряжений питания полностью не эффективна и не приводит к уменьшению потерь мощности в АД.

В то же время известно, что нормативные показатели качества электрической энергии всегда соответствуют требуемым, что определяет возможность работы асинхронных двигателей, например, в условиях несимметрии источника питания [8]. Появление несимметричных режимов работы трехфазных АД может быть обусловлено и другими факторами, например несимметрией сопротивлений в цепях статора или ротора [8]. Несимметричные режимы работы оказывают отрицательное влияние на рабочие показатели двигателей. 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 [9]. 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. Для обеспечения нормальных условий работы при питании от источника с несимметричным напряжением необходимо завышать номинальную мощность АД или предусматривать мероприятия по симметрированию напряжения источника питания [8, 9].

Теоретическим и практическим вопросам улучшения энергетики АД при его неполной нагрузке средствами ТПН в научно-технической литературе уделено достаточное внимание [4–7, 10]. Намного меньше литературных источников, где имеется информация о симметрировании токов АД в случае его питания от источника с несимметричным напряжением [11, 12]. Сведения же об одновременном использовании симметрирования и минимизации потерь АД при неполной нагрузке практически отсутствуют. Вместе с тем, современные средства управления электроприводом ТПН-АД позволяют решать задачи по уменьшению потерь в двигателе, проводить симметрирование токов АД, а также совмещать эти функции.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследований – синтез и анализ системы минимизации потерь мощности АД с одновременной функцией симметрирования токов статора.

Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

– математически обосновать возможность и условия уменьшения потерь

мощности в электроприводе ТПН-АД;

- выполнить синтез функциональной схемы и математическое описание системы минимизации потерь мощности АД;

- сформировать результаты минимизации потерь мощности и выполнить их анализ;

- сформировать результаты симметрирования токов статора АД и выполнить их анализ.

4. Материалы и методы исследования несимметричных режимов работы асинхронных двигателей

4.1. Экспериментальная база исследования

Исследование выполнялось как путем моделирования системы минимизации потерь АД (СМП), 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 [13]. 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 [12, 14].

При экспериментальном исследовании применялась физическая модель системы минимизации потерь мощности, выполненная на основе устройства плавного пуска (ТПН) MOELLER DS4 и асинхронного короткозамкнутого двигателя 4A90L4 2,2 кВт, 1500 об/мин. При проведении эксперимента использовались контрольно-измерительные устройства REFCO Halt-08, Fluke-16, National Instruments NI6009, NI9201-USB9162 кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета (Украина).

4.2. Математическое обоснование возможности и условий уменьшения потерь мощности в электроприводе ТПН-АД

Электропривод с тиристорным преобразователем напряжения позволяет выполнять минимизацию потерь мощности АД. Речь идет о продолжительной работе на искусственных характеристиках в области номинального скольжения с потерями в АД меньшими, чем на рабочем участке естественной характеристики. Управляющим воздействием является выходное напряжение преобразователя, а работа двигателя происходит на оптимальной регулировочной механической характеристике. Управление напряжением осуществляется вниз от номинального. Оптимальная характеристика рассчитывается заранее, исходя из решения задачи по экстремальному управлению согласно критерию минимума потерь мощности [4, 5].

При аналитическом описании процессов преобразования энергии учитывается ряд допущений:

- линейность магнитной цепи АД;

- линейность рабочего участка искусственной механической

характеристики АД;

– учет первых гармонических составляющих токов и напряжений статора двигателя.

Это позволяет вывести аналитическую зависимость закона управления, соответствующую оптимальной механической характеристике для любого из известных типов асинхронных двигателей. Учитываются четыре основные составляющие потерь АД. Для дальнейшего анализа их удобно разделить на две группы – потери от нагрузки и потери от намагничивания.

Известно, что потери от нагрузки, существующие в АД при номинальных условиях работы, описываются двумя составляющими

$$\Delta P_{\text{нгн}} = \Delta P_{1\text{мн}} + \Delta P_{2\text{мн}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{1\text{мн}}$ – потери в меди статора от тока нагрузки при номинальном моменте нагрузки, Вт; $\Delta P_{2\text{мн}}$ – потери в меди ротора от тока нагрузки при номинальном моменте нагрузки, Вт.

Суммарные потери в двигателе на намагничивание при номинальном режиме работы определяются

$$\Delta P_{\text{он}} = \Delta P_{1\text{моп}} + \Delta P_{\text{сн}}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{1\text{моп}}$ – потери в меди статора от тока намагничивания, Вт; $\Delta P_{\text{сн}}$ – потери в стали АД, Вт.

При регулировании координат АД изменением напряжения преобразователя, потери от нагрузки и на намагничивание определяются зависимостями [15]

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{нг}} &= \frac{M_c}{M_n} \cdot \frac{s}{s_n} \cdot \Delta P_{\text{нгн}}, \\ \Delta P_{\text{о}} &= \frac{M_c}{M_e} \cdot \Delta P_{\text{он}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_e – момент на естественной характеристике при скольжении, равном скольжению на искусственной характеристике при пониженном напряжении $U_1 < U_{1\text{н}}$.

При учете принятых допущений справедливо соотношение $\frac{M_c}{s} = \frac{M_n}{s_n}$, которое дает возможность выразить значение момента M_c через значение скольжения. Тогда потери определяются по выражению

$$\Delta P = \Delta P_{\text{нг}} + \Delta P_{\text{о}} = \frac{\Delta P_{\text{нгн}}}{M_n \cdot s_n} \cdot M_c \cdot s + \frac{\Delta P_{\text{он}} \cdot s_n}{M_n} \cdot M_c \cdot \frac{1}{s}. \quad (4)$$

Очевидно, что существует некоторое скольжение $s_{\text{опт}}$, при котором

суммарные потери в двигателе будут минимальными. Решение задачи по нахождению этого оптимального скольжения можно выполнить путем исследования на экстремум функции (4) и определения значения s , при котором величина ΔP принимает свое экстремальное (минимальное) значение. Для аналитического решения необходимо частную производную по скольжению выражения ΔP приравнять к нулю. Корни этого уравнения и характеризуют экстремумы исследуемой функции.

Согласно условию минимума потерь мощности, необходимо, чтобы АД в первом (третьем) квадранте работал на искусственной регулировочной характеристике с оптимальным скольжением

$$s_{\text{опт}} = s_n \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{обн}}}{\Delta P_{\text{нрн}}}} \quad (5)$$

Условие минимума потерь мощности будет выполняться при работе в области рабочих моментов от нуля до некоторого граничного момента $M_{\text{гр}}$.

$$M_{\text{гр}} = M_n \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{обн}}}{\Delta P_{\text{нрн}}}} \quad (6)$$

Значение граничного момента соответствует пересечению регулировочной механической характеристики с естественной и не зависит от текущих моментов нагрузки и скорости АД. Представления о механических характеристиках, на которых работает двигатель 4A90L4, дает рис. 1

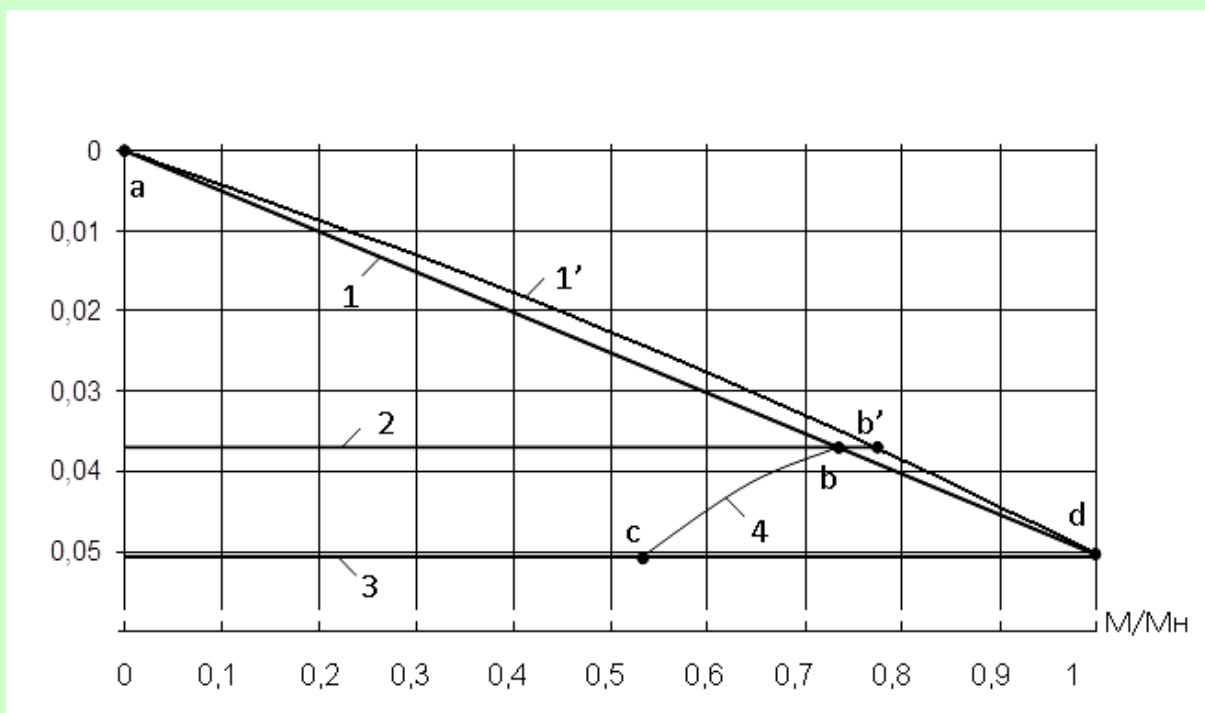


Рис. 1. Механические характеристики двигателя 4A90L4

Кривая 1 – это линейризованный участок естественной механической характеристики. Здесь же для сравнения приведен участок реальной естественной механической характеристики АД 4А90L4 (характеристика 1'), что позволяет оценить влияние линейризации. Прямая 2 – регулировочная характеристика, соответствующая оптимальному по критерию минимума потерь закону управления. Характеристика 3 соответствует регулированию АД с номинальным скольжением. Все рабочие точки, лежащие на характеристике 2, соответствуют оптимальному режиму. С увеличением момента эта характеристика пересекается с естественной в точке b (b'), соответствующей граничному моменту $M_{гр}$. При дальнейшем увеличении момента нагрузки режим перестает быть оптимальным. Положение этой точки и ширина рабочего участка оптимальной регулировочной характеристики зависят от соотношения между потерями на намагничивание и от нагрузки в номинальном режиме. Как следует из (6), граничный момент, для каждого из асинхронных двигателей определяется только собственными параметрами АД. В обоих случаях при увеличении или уменьшении скольжения, относительно характеристики 2, потери в двигателе увеличиваются. При уменьшении скольжения, увеличение потерь ограничивается естественной характеристикой. В нижней части, при увеличении скольжения, можно провести условную границу, где потери будут равны потерям на естественной характеристике. Эта граница соответствует линии 4 и названа «линией равных потерь» [4]. Область, ограниченная участком $a-b$ естественной характеристики, осью скольжений и линией равных потерь 4, является областью, в которой возможно формирование режимов с потерями в АД меньшими, чем на естественной характеристике. Эта область и используется при управлении оптимальном по критерию минимума потерь. Другие характеристики захватывают меньшую ширину этой области, а характеристика 3, кроме того, имеет участок $c-d$, находящийся вне указанной области. На этом участке двигатель работает не только не в оптимальном режиме, а с потерями мощности, превышающими потери на естественной характеристике. Рис. 2 иллюстрирует графики потерь мощности в АД на естественной и регулировочной характеристиках для исследуемого двигателя. Цифровые и буквенные обозначения кривых эквивалентны обозначениям на графиках рис. 1. Кривая 1 отображает суммарные потери в двигателе при работе на естественной характеристике. Идеальные графики потерь на любой регулировочной характеристике представляют собой прямые, проходящие через начало координат. Прямая 2 соответствует потерям на оптимальной регулировочной характеристике. Суммарные потери при поддержании скольжения номинальным во всем диапазоне рабочих моментов отображает прямая 3. Линия равных потерь сливается с частью $a-b$ параболы потерь. Область, ограниченная кривой $a-b$, осью ΔP и графиком потерь 2 является областью экономии мощности потерь. Любая рабочая точка на естественной характеристике, кроме точек, лежащих дальше точки b , будет получена при энергетике, худшей, чем в режиме минимизации. На участке $c-d$ характеристики 3 потери оказываются большими, чем на естественной характеристике.

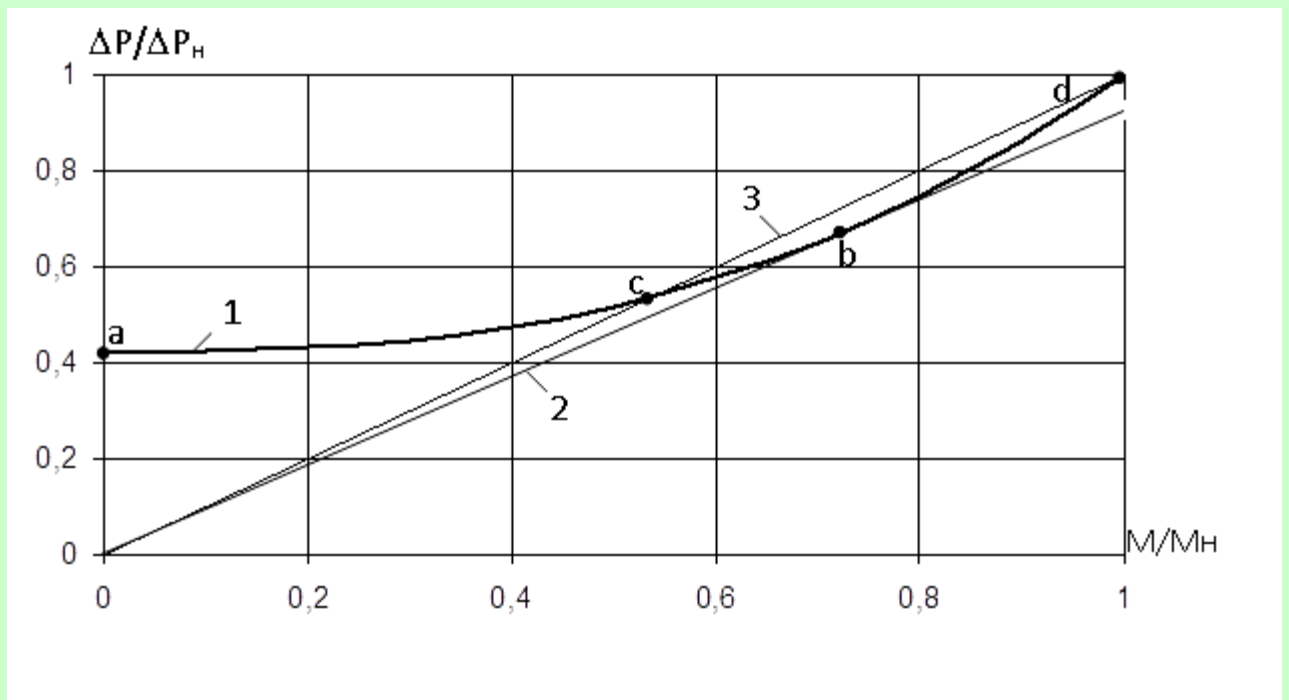


Рис. 2. Графики потерь мощности в АД 4А90L4

Техническая реализация режима минимизации потерь в установившемся режиме возможна только в замкнутых системах ЭП. Причем использовать обратную связь по скольжению (скорости) нецелесообразно, так как работа ЭП происходит в области близкой к номинальному скольжению. Это предъявляет жесткие требования к точности измеряемой величины и не всегда оправданно. Наиболее перспективным является способ, основанный на свойстве постоянства коэффициента мощности в режиме минимизации. Сигналами ОС, в данном случае, являются углы запаздывания окончания токов статора АД – δ . По аналогии с оптимальным скольжением для каждого АД существует $\delta_{\text{опт}}$, при работе с которым потери мощности будут минимальными, он определяется [15]

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\text{опт}} &= \arctg \frac{Q_{1н}}{P_{1гр}}, \\ P_{1гр} &= \omega_o M_{гр} + \Delta P_{м1н} \frac{\Delta P_{он}}{\Delta P_{нгр}} + \Delta P_{он}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $Q_{1н}$ – номинальная реактивная мощность АД, Вар; $P_{1гр}$ – активная мощность, потребляемая АД, на естественной характеристике при нагрузке $M_c = M_{гр}$, Вт; $\Delta P_{м1н}$ – потери в меди статора АД при номинальной нагрузке, Вт.

Представляет интерес исследовать возможность минимизации потерь АД в условиях несимметрии напряжения источника питания. Установлено, что в явном виде режим минимизации потерь АД не дает эффекта симметрирования. Вместе с тем, симметрирование токов статора приводит к значительному улучшению энергетических показателей АД. Однако известные системы автоматического симметрирования не инвариантны к изменению нагрузки [12]. Известные системы автоматической минимизации потерь предполагают использование их при симметричных по фазам параметрах источника питания

и АД. В подобных системах используется один регулятор и применяется симметричное управление и регулирование тиристоров ТПН [15]. В условиях несимметрии напряжения ИП необходимо применять раздельное пофазное управление, что обуславливает применение трех каналов управления и обратной связи. Это позволяет решать проблему минимизации потерь мощности АД за счет равенства углов нагрузки оптимальному углу $\delta_{\text{опт}}$ и получать эффект симметрирования за счет равенства углов δ в фазах АД.

5. Описание системы минимизации потерь мощности АД

Функциональная схема системы автоматической минимизации потерь мощности АД с функциями симметрирования изображена на рис. 3. В состав электромеханической системы входят:

- тиристорный преобразователь напряжения (ТПН);
- асинхронный двигатель (АД);
- устройство формирования задающего сигнала (УФЗ), задающее сигнал управления в функции угла $\delta_{\text{опт}}$;
- каналы управления фазами асинхронного двигателя (КУФА, КУФВ, КУФС);
- каналы обратной связи каждой из фаз (КОСФА, КОСФВ, КОСФС).

В состав каждого из каналов управления входит ПИ–регулятор угла δ (РД) и система импульсно–фазового управления – СИФУ (рис. 4, а). Каждый из каналов обратной связи включает в себя (рис. 4, б):

- датчик угла δ (ДД), измеряющий угол запаздывания тока за каждую половину периода напряжения ТПН;
- элемент памяти (ЭлП), хранящий значение напряжения обратной связи величина, которого обновляется через интервал времени $t=0,01$ сек.

Действие СМП начинается по окончании переходного процесса пуска АД. Принцип действия при симметричном напряжении ИП состоит в том, что при уменьшении нагрузки на валу АД (увеличении угла δ) действие обратной связи приводит к уменьшению выходного напряжения тиристорного преобразователя, что приводит к уменьшению токов статора АД. Вследствие этого, удается поддерживать равенство углов δ оптимальному значению $\delta_{\text{опт}}$. Это позволяет решать проблему минимизации потерь. При питании от источника с несимметричным напряжением одновременная минимизация потерь АД и симметрирование токов достигается за счет равенства углов δ в каждой из фаз АД. При этом углы включения вентиля тиристорного преобразователя принципиально не симметричны.

Систему автоматической минимизации потерь мощности АД возможно выполнить на основе электропривода ТПН-АД, как с синхронизацией с напряжением сети, так и с током нагрузки [5, 16]. Основным отличием, при проектировании системы автоматического управления, является параметр, относительно которого производится управление – α или γ . Значение оптимального угла δ можно найти на основании выражений (6), (7).

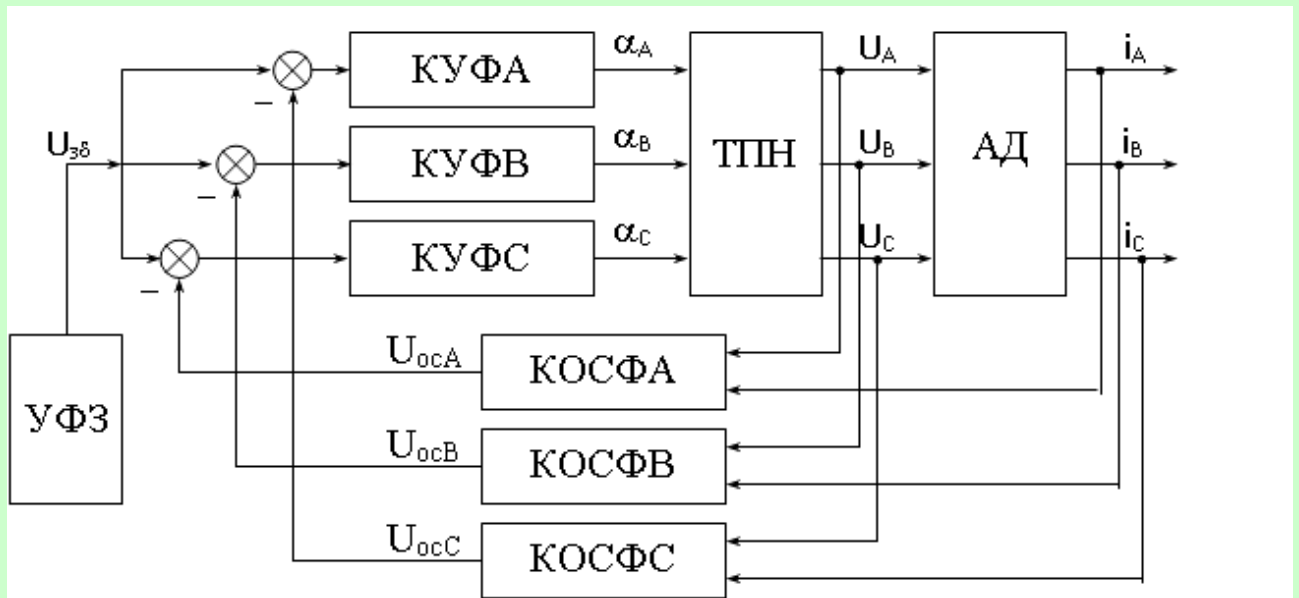


Рис. 3. Функциональная схема системы автоматической минимизации потерь АД

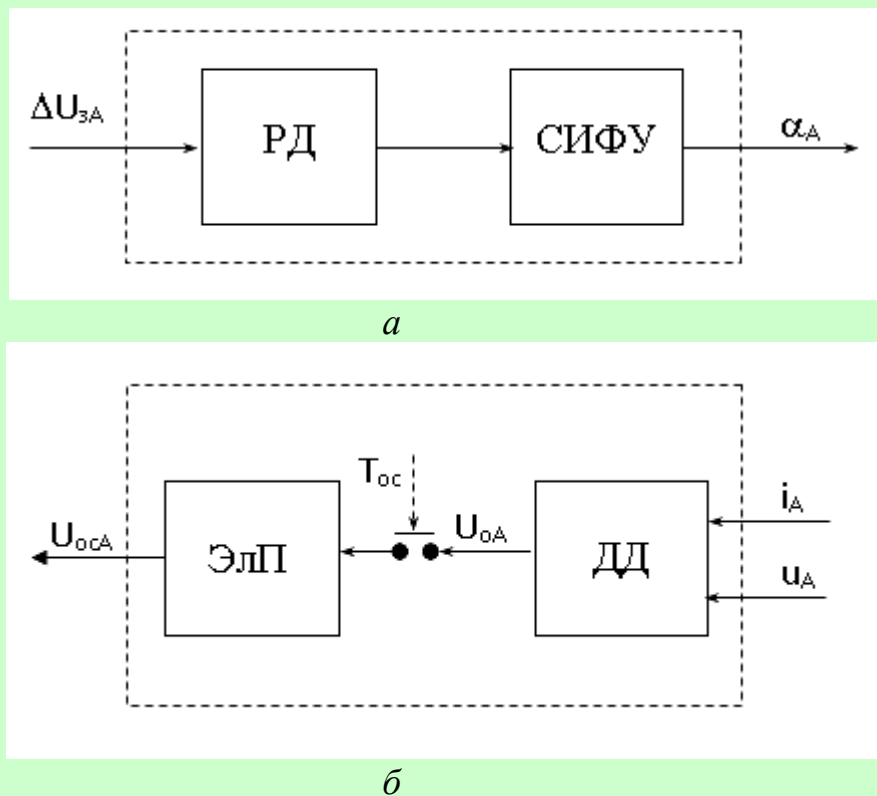


Рис. 4. Функциональные схемы: *а* – канала управления и *б* – канала обратной связи фазы А системы автоматической минимизации потерь АД

$$M_{гр} = 14,8 \cdot \sqrt{\frac{187,3}{364,7}} = 10,6 \text{ Нм}; \quad (9)$$

$$P_{1гр} = 157 \cdot 10,6 + 304,7 \cdot \frac{187,3}{364,7} + 187,3 = 2007,9 \text{ Вт}; \quad (10)$$

$$\delta_{\text{опт}} = \arctg \frac{1680,1}{2007,1} = 39,9 \text{ эл. град.} \quad (11)$$

Зависимость угла управления от управляющего напряжения выражается на основании выражения

$$\alpha = 0 - K_{\text{сифу } \alpha} U_{\text{вых рп}}, \quad (12)$$

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

$$K_{\text{сифу } \alpha} = \frac{\alpha_{\text{макс}}}{U_{\text{вых рп макс}}} = \frac{120}{10} = 1,2 \frac{\text{рад}}{\text{В}}. \quad (13)$$

Допускается, что канал обратной связи описывается усилительным звеном с коэффициентом передачи

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{ос макс}}}{\delta_{\text{макс}}}, \quad (14)$$

где $U_{\text{ос макс}} = 10 \text{ В}$ – максимальное напряжение обратной связи.

Угол $\delta_{\text{макс}}$ при обычных условиях работы в первом квадранте не превышает 90 эл. град, однако при существенной несимметрии напряжения ИП его значения в отдельных фазах могут достигать 120 эл. град.

Напряжение задатчика входного сигнала определяется, исходя из условия равенства напряжения задания и напряжения обратной связи при значении угла δ , равного оптимальному значению $\delta_{\text{опт}}$

$$U_{\text{зд}} = \delta_{\text{опт}} \cdot K_{\text{ос}}. \quad (15)$$

Каждый из регуляторов углов δ представляет собой ПИ–регулятор, который описывается передаточной функцией

$$H_{\text{рб}}(p) = \frac{1}{K_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot T_{\text{з}} \cdot K_{\delta}} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{K_{\text{м}} \cdot K_{\text{м}}} + \frac{1}{4 \cdot T_{\text{з}} \cdot p \cdot K_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot T_{\text{з}} \cdot K_{\delta}} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{K_{\text{м}} \cdot K_{\text{м}}} = K_{\text{п}} + \frac{K_{\text{и}}}{p}, \quad (16)$$

где $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{и}}$ – коэффициенты при пропорциональной и интегральной составляющих, соответственно.

Для двигателя 4A90L4, на примере которого выполняются исследования, расчетные значения коэффициентов регуляторов углов δ составляют: $K_{\text{п}} = 0,46$ и $K_{\text{и}} = 16,2$, соответственно.

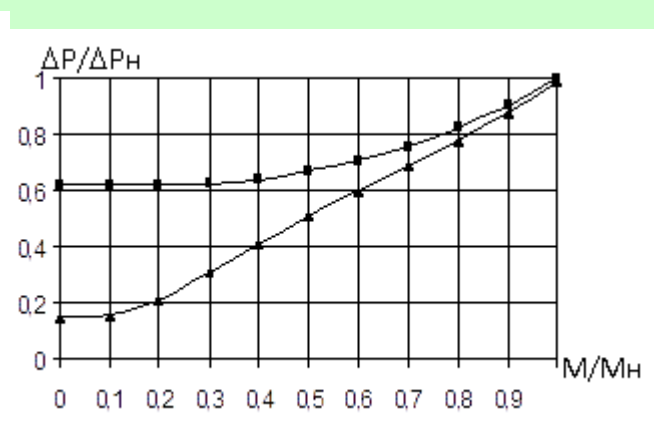
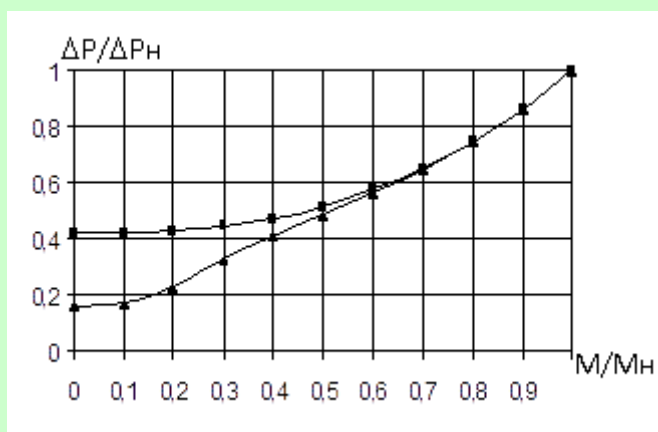
6. Обсуждение результатов минимизации потерь и симметрирования токов АД

Исследование показателей работы системы автоматической минимизации потерь проводилось для нескольких асинхронных двигателей общепромышленного исполнения серии 4А [17]. Для каждого из АД был произведен расчет условий уменьшения потерь мощности и параметров системы автоматической минимизации потерь. Характерные параметры исследуемых электродвигателей сведены в табл. 2. Для случая питания ЭП ТПН-АД от источника с симметричным напряжением результаты минимизации в виде графиков потерь в асинхронных двигателях приведены на рис. 6. Кривые определяют потери мощности в АД, выраженные в относительных единицах, при работе на естественных и регулировочных характеристиках в режиме минимизации при различных моментах нагрузки.

Таблица 2

Характерные параметры исследуемых электродвигателей

Тип АД	P_1 , кВт	ΔP_{Σ} , кВт	$M_{гр}/M_H$, о. е.	$\delta_{опт}$, град.
4А90L4	2,2	0,58	0,72	39,9
4АС132М8	6,0	1,87	1,07	45,7
4АР160М8	11,0	2,03	0,93	41,6
4А315S12	45,0	6,20	1,08	41,1



а б

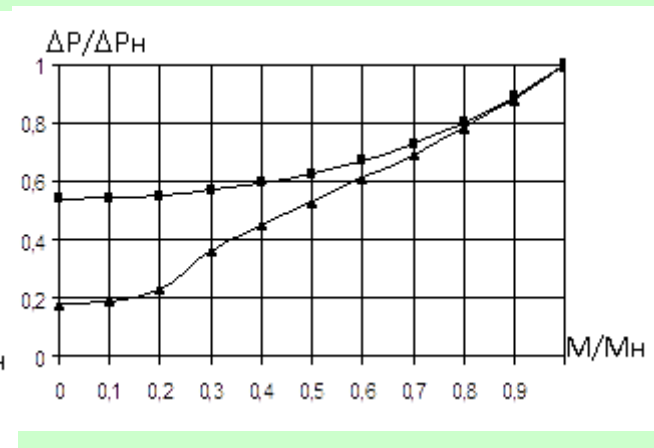
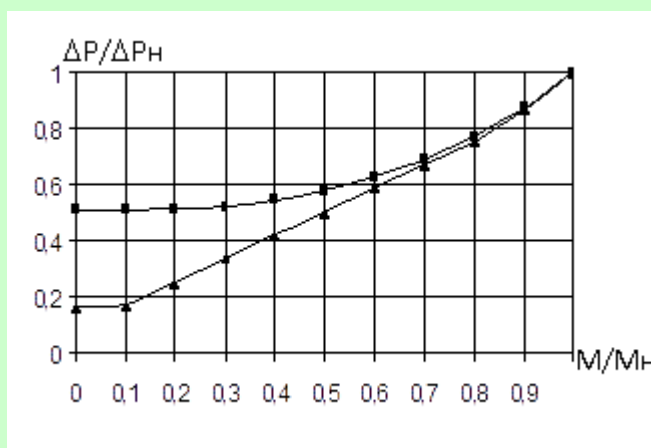


Рис. 6. Графики потерь мощности в асинхронных двигателях: \blacksquare — на естественной механической характеристике; \blacktriangle — на регулировочной оптимальной характеристике; *a* — 4AC132M8, $K_u=0$; *b* — 4A315S12, $K_u=0$; *в* — 4AC132M8, $K_u=5\%$; *г* — 4A315S12, $K_u=5\%$.

Результаты показывают, что СМП обеспечивает значительное уменьшение потерь в АД в диапазоне рабочих моментов $0 \leq M \leq M_{гр}$. Незначительное расхождение между значениями граничных моментов, полученных при помощи эксперимента и расчетными значениями, можно объяснить принятыми допущениями и, в частности, линейностью механических характеристик АД (рис. 2). Расхождения не превышают 4%.

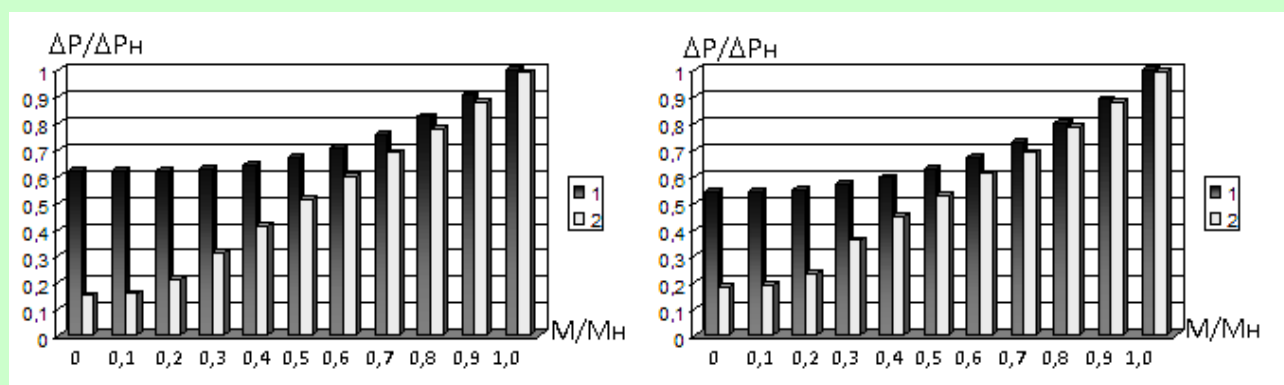
Нелинейность оптимальных характеристик в области малых нагрузок и отсутствие пересечения с началом координат обусловлено естественными ограничениями ТПН в режимах близких к холостому ходу. Наибольший эффект режим минимизации потерь дает в тех случаях, когда энергетические показатели электрических двигателей, в силу их специфики, оказываются невысокими. Утверждения о том, что режим минимизации потерь возможен только в области моментов нагрузки $0 \leq M \leq (0,4 \dots 0,6) M_n$ верны и относятся к АД нормального исполнения, причем с «хорошей» энергетикой [4]. Вместе с тем, существует множество АД, для которых значения граничных моментов $M_{гр}$ находятся в диапазоне $0,6 \dots 2,0 M_n$. Это относится, прежде всего, к двигателям с низкими значениями коэффициентов полезного действия и коэффициентов мощности: многополюсным, с повышенным скольжением, пусковым моментом, увеличенным воздушным зазором и т. д. Это подтверждается результатами исследования.

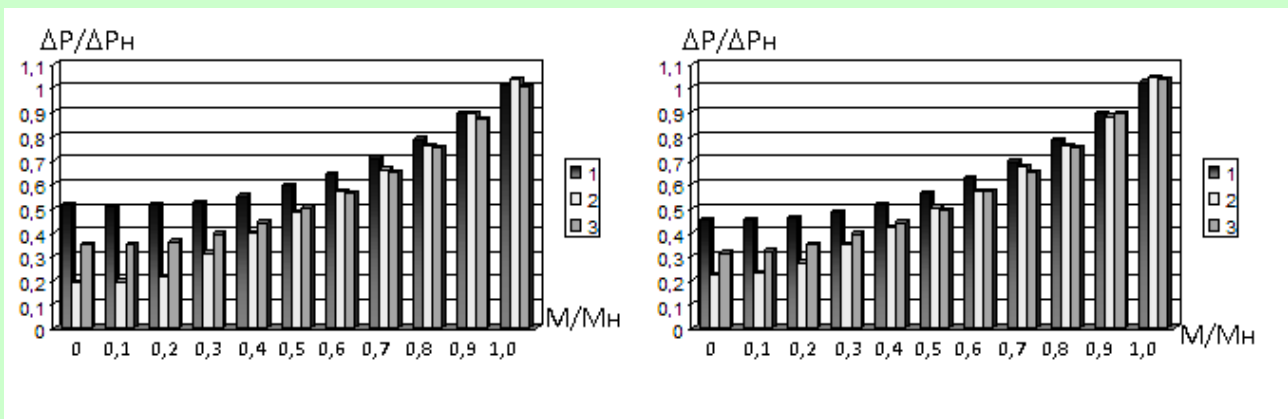
Наилучшие показатели по улучшению энергетических показателей ЭП ТПН-АД наблюдаются в режиме ХХ и при малых моментах нагрузки. Это выражается в уменьшении суммарных потерь, за счет уменьшения потерь мощности в АД на намагничивание благодаря уменьшению напряжения на статоре. Снижение потерь на намагничивание приводит к уменьшению реактивной мощности, потребляемой АД, а, следовательно, к увеличению коэффициента мощности. При работе исследуемой СМП асинхронные двигатели избавляются от одного из главных своих недостатков — существенного уменьшения коэффициента мощности при уменьшении нагрузки. Для исследуемых асинхронных двигателей, при малых нагрузках, наблюдается увеличение коэффициентов мощности более чем в два раза.

При питании ЭП ТПН-АД от источника с несимметричным напряжением основные принципы работы системы минимизации потерь сохраняются. Результаты минимизации удобно представить в виде гистограмм относительных потерь мощности в АД. Результаты представляются для нескольких значений несимметрии ИП при работе АД на основной характеристике и на регулировочной. Они изображены на рис. 7. В данном случае, под основной понимается характеристика, на которой работает АД при несимметричном напряжении ИП и полностью открытых вентилях ТПН. Так же на рис. 7 указаны гистограммы относительных потерь, полученные в

процессе работы, ранее разработанной, системы автоматического симметрирования токов АД для тех же условий [12].

При несимметрии напряжения ИП, определяемой коэффициентами $K_u < 5 \dots 7 \%$, СМП обеспечивает лучшие показатели уменьшения потерь мощности для всех исследуемых двигателей, что особенно показательно при небольших моментах нагрузки. При существенной несимметрии, превышающей предельно-допустимое значение более чем в 2 раза ($K_u > 8 \%$) для двигателей средней и большой мощности система автоматического симметрирования токов АД наиболее эффективна. С увеличением несимметрии напряжения ИП, определяемой коэффициентами $K_u > 2 \%$, наблюдается некоторое уменьшение граничных моментов в среднем на $5 \dots 20 \%$, относительно $M_{гр}$ в случае питания симметричным напряжением, в зависимости от типа АД и величины несимметрии. Причем, что особенно важно, режим минимизации начинается при моментах нагрузки, больших значения $M_{гр}$. Обозначим это значение момента нагрузки как момент начала работы системы – $M_{нрс}$. Потери в области моментов $M_{гр} \leq M \leq M_{нрс}$ превышают потери на основной характеристике, причем количественные показатели этого превышения определяются типом АД, величиной несимметрии и текущей нагрузкой на валу. Чем больше несимметрия источника питания, тем при больших значениях моментов нагрузки начинается режим минимизации. Для большинства исследуемых АД при несимметрии, определяемой коэффициентами $K_u \leq 3 \%$, дисперсия потерь при работе на основной и регулировочной характеристиках не превышает 5% . При коэффициентах несимметрии напряжения $K_u > 4 \dots 5 \%$ значения моментов нагрузки, при которых начинается работа СМП, достигают и превышают значения номинальных моментов. Если теоретически допустить работу АД с этой нагрузкой, дисперсия потерь может составлять 20% и более.





в г

Рис. 7. Гистограммы относительных потерь мощности: 1 – на естественной характеристике; 2 – на оптимальной характеристике при работе с обратной связью по δ ; 3 – при работе системы симметрирования токов статора; а – 4АС132М8, $K_u=0$; б – 4А315S12, $K_u=0$; в – 4АС132М8, $K_u=5\%$; г – 4А315S12, $K_u=5\%$

Работа СМП в условиях питания от источника с несимметричным напряжением позволяет не только минимизировать потери мощности в АД, но и получить эффект симметрирования, свойственный системам автоматического симметрирования. Осциллограммы скорости и токов статора двигателя 4А90L4 при работе в составе СМП, изображенные на рис. 8, иллюстрируют это.

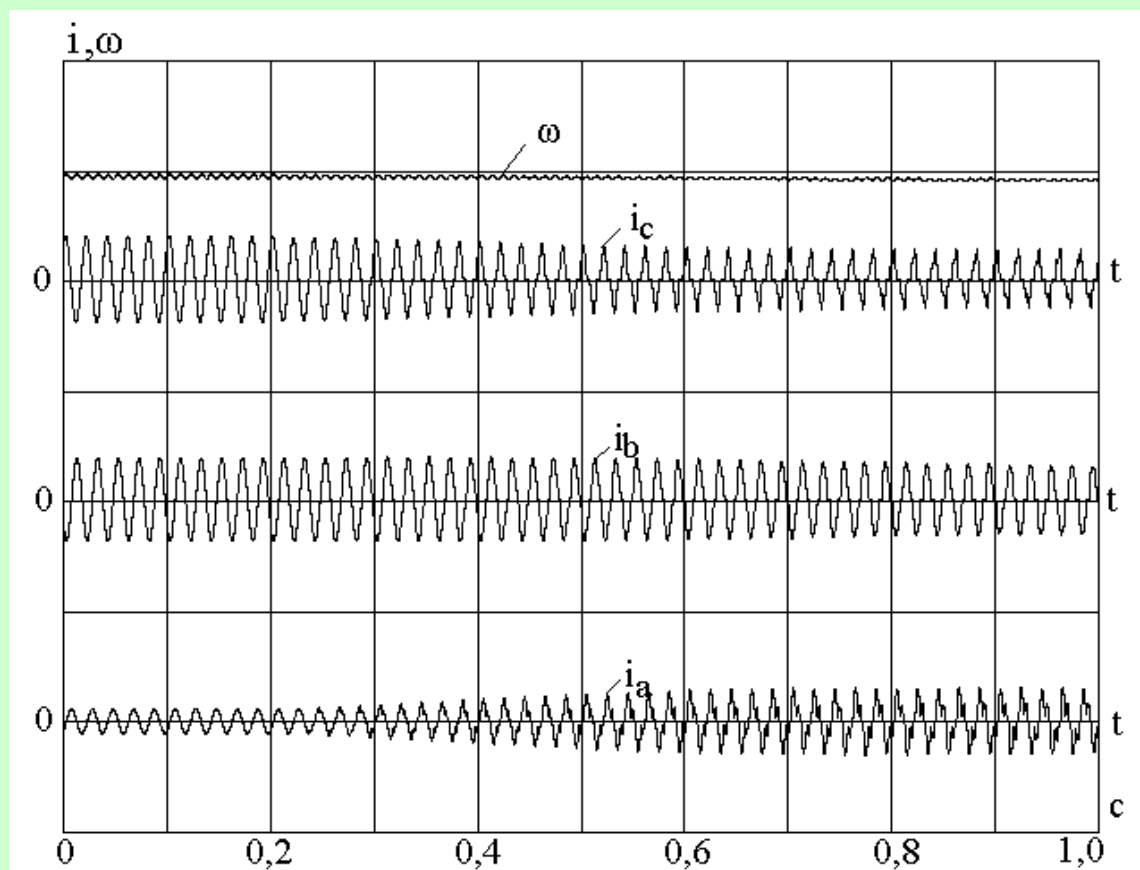


Рис. 8. Осциллограммы скорости и токов статора АД 4А90L4 при работе в составе СМП

В промежутке времени $0 \leq t < 0,2$ сек. двигатель 4А90L4 работает в составе ЭП ТПН-АД на основной характеристике с моментом нагрузки $M=0,2M_n$, суммарным моментом инерции $J_{\Sigma}=2J_{эд}$ и при несимметрии напряжения ИП, определяемой $K_u=5\%$. Время $t=0,2$ сек. соответствует началу включения СМП. Дальнейшая работа системы приводит к значительному уменьшению проявлений несимметрии напряжения источника питания. Это дает право утверждать, что равенство углов δ по фазам АД приводит к «выравниванию» значений действующих токов статора и позволяет решать проблему совместной минимизации потерь мощности в АД и симметрирования [12].

Для всех исследуемых двигателей при моментах нагрузки $0 \leq M \leq M_{гр}$ наблюдаются уменьшение колебаний скорости, вызванных несимметрией напряжения. Это обусловлено уменьшением составляющей рабочего момента АД, частота которой составляет сто герц. Наибольший эффект достигается при несимметрии ИП, определяемой коэффициентами $K_u < 5\%$, а именно уменьшение на 20...300%. При большей несимметрии ИП показатели несколько хуже.

Показатели симметрирования токов АД, выраженные в изменении коэффициентов несимметрии на примере работы СМП с двигателем 4А90L4, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели симметрирования токов АД

M_c/M_n	$K_u=2,5\%$		$K_u=5\%$		$K_u=10\%$	
	K_{io}^*	$K_{i\text{ СМП}}^{**}$	K_{io}	$K_{i\text{ СМП}}$	K_{io}	$K_{i\text{ СМП}}$
0,9	0,131	0,131	×	×	×	×
0,8	0,147	0,180	×	×	×	×
0,7	0,165	0,240	0,314	0,390	×	×
0,6	0,188	0,191	0,358	0,345	0,678 (×)	0,686
0,5	0,214	0,164	0,411	0,321	0,767	0,686
0,4	0,243	0,129	0,472	0,262	0,922	0,722
0,3	0,275	0,108	0,539	0,221	1,083	0,779
0,2	0,303	0,077	0,604	0,160	1,257	0,810
0,1	0,320	0,065	0,649	0,155	1,398	0,831
0	0,322	0,063	0,658	0,157	1,456	0,830

Примечания: * – K_{io} – коэффициент несимметрии токов АД в разомкнутой системе ЭП ТПН-АД; ** – $K_{i\text{ СМП}}$ – коэффициент несимметрии токов АД в замкнутой системе автоматической минимизации потерь мощности; × – длительная работа разомкнутой системы ЭП ТПН-АД невозможна по условию нагрева АД

При моментах нагрузки на валу АД меньших граничного момента, коэффициенты несимметрии токов АД уменьшаются относительно коэффициентов при работе АД на основной механической характеристике. Наибольший эффект достигается при работе в режимах близких к идеальному холостому ходу. Значения граничных моментов уменьшаются и составляют не более (0,57...0,62) относительно номинального момента M_n . Моменты начала работы СМП при различной величине несимметрии напряжения ИП составляют, соответственно: $K_u=2,5\%$, $M_{нрс}\approx 0,88M_n$; $K_u=5\%$, $M_{нрс}\approx 0,96M_n$; $K_u=10\%$, $M_{нрс}>M_n$. Физический процесс отсутствия перехода на основную механическую характеристику при нагрузке, превышающей граничный момент $M_{нрс}$, объясняется существенным неравенством углов δ по фазам АД в условиях несимметрии напряжения источника питания. В то время как углы δ двух фаз не превышают значение $\delta_{опт}$, угол третьей фазы может быть изначально больше этого значения. Это приводит к началу работы каналов обратной связи и управления этой фазы и, как следствие, всей СМП в целом. Как и в исследованиях потерь мощности, при моментах нагрузки $M_{гр}\leq M\leq M_{нрс}$ работа системы минимизации потерь мощности приводит к увеличению несимметрии токов АД. Эти обстоятельства позволяют для двигателей с «хорошей» энергетикой, расширять диапазон моментов нагрузки, при которых возможна нормальная работа АД, только при существенной несимметрии напряжения ИП. Так, для исследуемого асинхронного двигателя 4А90L4 при несимметрии напряжения ИП, определяемой коэффициентом $K_u=10\%$ действие СМП обеспечивает верхнюю границу возможных рабочих моментов нагрузки на уровне близком к $M_{гр}\approx 0,62M_n$. При несимметрии ИП с $K_u<8\%$ работа системы, напротив, приводит к ограничению диапазона рабочих моментов АД. Превышение нагрузки на валу АД значения $M_{гр}$ приведет к срабатыванию тепловой защиты и отключению двигателя [4]. Для двигателей с «плохой» энергетикой эти проблемы не актуальны, так как у них значения граничных моментов, обеспечивающих начало режима минимизации потерь и симметрирования токов, достаточно велики. Переход на основную характеристику, посредством системы управления, не решает задачи симметрирования, однако при несимметрии напряжения ИП, определяемой коэффициентами $K_u<5...7\%$, оказывается полезен. Систему управления СМП необходимо дополнить логическим блоком. Он дает разрешение на начало работы всех каналов обратной связи. Это возможно только в случае превышения значения опорного напряжения $U_{оп}$ значения напряжения датчика U_{δ} . Напряжение датчика при этом фиксировано и соответствует оптимальному углу $\delta_{опт}$. Формирование опорного напряжения возможно осуществить несколькими способами. Все предполагают текущий контроль выходных величин ЭП. Наиболее простым и перспективным является способ, основанный на учете углов δ всех фаз АД. Значение опорного напряжения формируется из текущих напряжений обратной связи по углу δ на основании выражения

$$U_{\text{оп}} = \frac{U_{\text{ocA}} + U_{\text{ocB}} + U_{\text{ocC}}}{3}. \quad (17)$$

Для всех исследуемых двигателей, при $K_u \leq 5\%$, опорное напряжение (17) начинает превышать задающее при нагрузках, близких к значениям соответствующих граничных моментов. При нагрузках больших значения граничного момента $M_{\text{гр}}$, каналы обратной связи СМП не работают, а АД работает на основной механической характеристике.

7. Выводы

1. Предложена структура системы автоматической минимизации потерь с одновременными функциями симметрирования при питании от источника с несимметричным напряжением. В системе реализовано раздельное пофазное управление, что обуславливает применение трех каналов управления и обратной связи.

2. Проблема минимизации потерь мощности в АД решается за счет поддержания равенства углов δ оптимальному значению. При питании от источника с несимметричным напряжением одновременная минимизация потерь мощности в АД и симметрирование токов достигается за счет равенства углов δ в каждой из фаз АД. При этом углы включения вентиля ТПН принципиально не симметричны.

3. При питании СМП от источника питания с симметричным напряжением система обеспечивает уменьшение потерь мощности в диапазоне рабочих моментов $0 \leq M \leq M_{\text{гр}}$ на $5 \dots 45\%$ относительно потерь при работе на основной механической характеристике;

– экономия энергии в режиме минимума потерь мощности достигается за счет уменьшения потерь на намагничивание при уменьшении напряжения на статоре АД. Уменьшается потребляемая реактивная мощность, что приводит к увеличению коэффициента мощности АД;

– наибольший эффект система автоматической минимизации потерь дает в тех случаях, когда энергетические показатели асинхронных двигателей, оказываются неудовлетворительными.

4. При питании СМП от источника питания с несимметричным напряжением:

– эффект минимизации потерь мощности в АД сохраняется;

– наблюдается эффект симметрирования, характеризующийся уменьшением коэффициентов несимметрии токов в $1,5 \dots 6$ раз, а также уменьшением негативных последствий, вызванных несимметрией напряжения источника питания, что характерно для всех исследуемых двигателей серии 4А;

– предложенную систему минимизации потерь мощности целесообразно применять для АД, при питании от источника с несимметрией напряжения ИП, определяемой коэффициентами $K_u \leq 6 \dots 7\%$.

Литература !! DOI

1. Liang, X. Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications

[Text] / X. Liang, O. Pochonwu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, Issue 1. – P. 271–280. doi: 10.1109/icps.2010.5489897

2. Бабакин, В. И. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] / В. И. Бабакин. – Уфа: УГНТУ, 2007. – 224 с.

3. Gui-xi, J. Research on Intelligent Soft Starter of Asynchronous Electromotor [Text] / J. Gui-xi, S. Hong-jun // 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems. – 2009. doi: 10.1109/gcis.2009.104

4. Бойко, А. А. Анализ возможности экономии энергии потребляемой лифтовыми лебедками при применении тиристорных преобразователей напряжения [Текст] / А. А. Бойко // Підйомно-транспортна техніка. – 2014. – Вып. 3 (43). – С. 54–63.

5. Tremlin, R. Soft-Start drives [Text] / R. Tremlin // Wire Ind. – 2006. – Vol. 626. – P. 92–96.

6. Tunyasirut, S. Phase control thyristor based soft-starter for a grid connected induction generator for wind turbine system [Text] / S. Tunyasirut, B. Wangsilabatra, T. Suksri // Control Automation and Systems (ICCAS), International Conference. – 2010. – Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5669944/>

7. Yeh, C.-C. Fault-Tolerant Soft Starter Control of Induction Motors With Reduced Transient Torque Pulsations [Text] / C.-C. Yeh, N. A. O. Demerdash // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2009. – Vol. 24, Issue 4. – P. 848–859. doi: 10.1109/tec.2009.2025340

8. Braslavskij, I. Thyristor controlled asynchronous electrical drive without speed sensor [Text] / I. Braslavskij, A. Zyuzev, K. Nesterov // 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – 2008. doi: 10.1109/speedham.2008.4581098

9. Лютаревич, А. Г. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии [Текст] / А. Г. Лютаревич, В. Н. Горюнов, С. Ю. Долингер, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 168–173.

10. 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.

11. Zhang, P. A Nonintrusive Winding Heating Method for Induction Motor Using Soft Starter for Preventing Moisture Condensation [Text] / P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, B. Lu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – Vol. 48, Issue 1. – P. 117–123. doi: 10.1109/tia.2011.2175875

12. Бойко, А. А. Синтез и исследование системы автоматического симметрирования токов асинхронного двигателя с преобразователем напряжения [Текст] / А. А. Бойко, В. В. Будашко, Е. А. Юшков, Н. А. Бойко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 1, № 2 (79). – С. 22–34. doi: 10.15587/1729-4061.2016.60544

13. Бойко, А. О. Моделирование системы ТПН-АД [Текст] / А. О. Бойко, А. А. Бересан // Математическое моделирование. – 2010. – С. 39–42.

14. Митяшин, Н. П. Модели чувствительности фазовых напряжений к изменению управляющих воздействий системы симметрирования напряжений автономной сети [Текст] / Н. П. Митяшин, В. А. Дерунов, Л. Ю. Арефьев // Проблемы энергетики. – 2005. – С. 99–106.

15. Петров, Л. П. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода [Текст] / Л. П. Петров, О. А. Андрющенко, В. И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 200 с.

16. 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.

17. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А [Текст]: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

References !! DOI

1. Liang, X. Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications [Text] / X. Liang, O. Ilochonwu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, Issue 1. – P. 271–280. doi: 10.1109/icps.2010.5489897

2. Babakin, V. I. Avtomatizirovannyi elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov [Text] / V. I. Babakin. – Ufa: UGNTU, 2007. – 224 p.

3. Gui-xi, J. Research on Intelligent Soft Starter of Asynchronous Electromotor [Text] / J. Gui-xi, S. Hong-jun // 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems. – 2009. doi: 10.1109/gcis.2009.104

4. Boyko, A. A. Analiz vozmozhnosti ekonomyi energiyi potrebyaemoy liftovymi lebedkami pri primeneni tiristornykh preobrazovateley napryazheniya [Tekst] / A. A. Boyko // Pidiomno-transportna tekhnika. – 2014. – Issue 3 (43). – P. 54–63.

5. Tremlin, R. Soft-Start drives [Text] / R. Tremlin // Wire Ind. – 2006. – Vol. 626. – P. 92–96.

6. Tunyasrirut, S. Phase control thyristor based soft-starter for a grid connected induction generator for wind turbine system [Text] / S. Tunyasrirut, B. Wangsilabatra, T. Suksri // Control Automation and Systems (ICCAS), International Conference. – 2010. – Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5669944/>

7. Yeh, C.-C. Fault-Tolerant Soft Starter Control of Induction Motors With Reduced Transient Torque Pulsations [Text] / C.-C. Yeh, N. A. O. Demerdash // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2009. – Vol. 24, Issue 4. – P. 848–859. doi: 10.1109/tec.2009.2025340

8. Braslavskij, I. Thyristor controlled asynchronous electrical drive without speed sensor [Text] / I. Braslavskij, A. Zyuzev, K. Nesterov // 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – 2008. doi: 10.1109/speedham.2008.4581098

9. Lyutarevich, A. G. Voprosy modelirovaniya ustroystv obespecheniya kachestva elektricheskoy energiyi [Tekst] / A. G. Lyutarevich, V. N. Goryunov, S. Yu. Dolinger, K. V. Hatsevskiy // Omskiy nauchnyy vestnik. – 2013. – Issue 1 (117).

– P. 168–173.

10. Pinchuk, O. G. Energeticheskie pokazateli asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh parametroh nessimetrii pitayushchego napryazheniya [Tekst] / O. G. Pinchuk // Elektrotehnika i enerhetyka. Naukovi pratsi DonNTU. – 2008. – Issue 8 (140). – P. 201–205.

11. Zhang, P. A Nonintrusive Winding Heating Method for Induction Motor Using Soft Starter for Preventing Moisture Condensation [Text] / P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, B. Lu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – Vol. 48, Issue 1. – P. 117–123. doi: [10.1109/tia.2011.2175875](https://doi.org/10.1109/tia.2011.2175875)

12. Boyko, A. A. Synthesis and research of automatic balancing system of voltage converter fed induction motor currents [Text] / A. A. Boyko, V. V. Budashko, E. A. Yushkov, N. A. Boyko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 1, Issue 2 (79). – P. 22–34. doi: [10.15587/1729-4061.2016.60544](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60544)

13. Boyko, A. O. Modelirovanie sistemy TPN-AD [Text] / A. O. Boyko, A. A. Beresan // Matematicheskoe modelirovanie. – 2010. – P. 39–42.

14. Mityashin, N. P. Modeli chuvstvitel'nosti fazovyh napryazheniy k izmeneniyu upravlyayushchih vozdeystviy sistemy simmetrirovaniya napryazheniy avtonomnoy seti [Text] / N. P. Mityashin, V. A. Derunov, L. Yu. Aref'ev // Problemy energetiki. – 2005. – P. 99–106.

15. Petrov, L. P. Tiristornye preobrazovateli napryazheniya dlya asinhronnogo elektroprivoda [Text] / L. P. Petrov, O. A. Andryushchenko, V. I. Kapinos et. al. – Moscow: Energoatomizdat, 2000. – 200 p.

16. 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.

17. Kravchik, A. E. Asinhronnye dvigateli serii 4A [Text]: spravochnik / A. E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin. – Moscow: Energoizdat, 1982. – 504 p.

References !! DOI

1. Liang, X., Ilochonwu, O. (2011). Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications. IEEE Transactions on Industry Applications, 47 (1), 271–280. doi: [10.1109/icps.2010.5489897](https://doi.org/10.1109/icps.2010.5489897)

2. Babakin, V. I. (2007). Avtomatizirovannyi elektroprivod tipovyh proizvodstvennyh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov. Ufa: UGNTU, 224.

3. Gui-xi, J., Hong-jun, S. (2009). Research on Intelligent Soft Starter of Asynchronous Electromotor. 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems. doi: [10.1109/gcis.2009.104](https://doi.org/10.1109/gcis.2009.104)

4. Boyko, A. A. (2014). Analiz vozmozhnosti ekonomyi energiyi potrebyaemoy liftovymi lebedkami pri primeneniyi tiristornyh preobrazovateley napryazheniya. Pidiomno-transportna tekhnika, 3 (43), 54–63.

5. Tremlin, R. (2006). Soft-Start drives. Wire Ind, 626, 92–96.

6. Tunyasrirut, S., Wangsilabatra, B., Suksri, T. (2010). Phase control thyristor based soft-starter for a grid connected induction generator for wind turbine

system. Control Automation and Systems (ICCAS), International Conference. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5669944/>

7. Yeh, C.-C., Demerdash, N. A. O. (2009). Fault-Tolerant Soft Starter Control of Induction Motors With Reduced Transient Torque Pulsations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (4), 848–859. doi: [10.1109/tec.2009.2025340](https://doi.org/10.1109/tec.2009.2025340)

8. Braslavskij, I., Zyuzev, A., Nesterov, K. (2008). Thyristor controlled asynchronous electrical drive without speed sensor. 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. doi: [10.1109/speedham.2008.4581098](https://doi.org/10.1109/speedham.2008.4581098)

9. Lyutarevich, A. G., Goryunov, V. N., Dolinger, S. Yu., Hatsevskiy, K. V. (2013). Voprosy modelirovaniya ustroystv obespecheniya kachestva elektricheskoy energii. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 1 (117), 168–173.

10. Pinchuk, O. G. (2008). Energeticheskie pokazateli asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh parametrah nessimetryi pitayushchego napryazheniya. *Elektrotehnika i enerhetyka. Naukovi pratsi DonNTU*, 8 (140), 201–205.

11. Zhang, P., Du, Y., Habetler, T. G., Lu, B. (2012). A Nonintrusive Winding Heating Method for Induction Motor Using Soft Starter for Preventing Moisture Condensation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48 (1), 117–123. doi: [10.1109/tia.2011.2175875](https://doi.org/10.1109/tia.2011.2175875)

12. Boyko, A. A., Budashko, V. V., Yushkov, E. A., Boyko, N. A. (2016). Synthesis and research of automatic balancing system of voltage converter fed induction motor currents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (2 (79)), 22–34. doi: [10.15587/1729-4061.2016.60544](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60544)

13. Boyko, A. O., Beresan, A. A. (2010). Modelirovanie sistemy TPN-AD. *Matematicheskoe modelirovanie*, 39–42.

14. Mityashin, N. P., Derunov, V. A., Aref'ev, L. Yu. (2005). Modeli chuvstvitel'nosti fazovyh napryazheniy k izmeneniyu upravlyayushchih vozdeystviy sistemy simmetrirovaniya napryazheniy avtonomnoy seti. *Problemy energetiki*, 99–106.

15. Petrov, L. P., Andryushchenko, O. A., Kapinos, V. I. et. al. (2000). *Tiristornye preobrazovateli napryazheniya dlya asinhronnogo elektroprivoda*. Moscow: Energoatomizdat, 200.

16. Prado, A., Kurokawa, S., Bovolato, L., Filho, J. (2011). Phase-Mode Transformation Matrix Application for Transmission Line and Electromagnetic Transient Analyses. New York: Nova Science Pub Inc, 40.

17. Kravchik, A. E., Shlaf, M. M., Afonin, V. I. (1982). *Asinhronnye dvigateli serii 4A*. Moscow: Energoizdat, 504.

Выполнено математическое описание режимов работы электропривода ТПН-АД, в которых возможно уменьшение потерь мощности. Уточняется, что речь идет о продолжительной работе асинхронного двигателя на искусственных характеристиках в области номинального скольжения с энергетикой лучшей, чем на рабочем участке естественной механической характеристики. Выполнена разработка системы автоматической

минимизации потерь мощности асинхронного двигателя. Показано, что в условиях питания электропривода от источника с несимметричным напряжением необходимо применять пофазное управление, которое обуславливает применение трех каналов управления и трех каналов обратной связи. Логика действия обратной связи заключается в том, что при уменьшении нагрузки АД она приводит к уменьшению выходного напряжения ТПН и токов двигателя. Вследствие этого появляется возможность поддерживать равенство углов нагрузки всех фаз оптимальному значению. Это позволяет решать, проблему минимизации потерь АД за равенства углов нагрузки оптимальному значению, и симметрирования за счет равенства углов нагрузки по фазам двигателя. Указаны количественные показатели уменьшения потерь мощности, а также показатели симметрирования при питании электропривода от источника с несимметричным напряжением. Иллюстрированы особенности работы системы минимизации потерь и пути повышения ее эффективности. Указано, что использование предложенной системы управления приводит к улучшению и энергетических и динамических показателей асинхронного электропривода. Фиксируется уменьшение потерь мощности в диапазоне рабочих моментов $0 \leq M \leq M_{\text{эр}}$ на 5...45 %, относительно потерь при работе на основной механической характеристике. Эффект симметрирования характеризуется уменьшением коэффициентов несимметрии токов в 1,5...6 раз.

Применение тиристорного преобразователя напряжения дает возможность реализации управляемых переходных пуско–тормозных режимов. Симметрирование действующих токов асинхронного двигателя на 80-150% уменьшает вибрационные составляющие электромагнитного момента в установленном режиме.

Keywords: асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь, электропривод, минимизация потерь, несимметрия напряжений, симметрирование.

Бойко Андрей Александрович
Доктор технических наук, доцент, директор
Институт электромеханики и энергоменеджмента
Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: dart77@ukr.net
Контактный тел.: 067–743–47–44

Сведения о наличии печатных произведений в общегосударственных и международных базах данных: 72
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>

Бойко Андрій Олександрович
Доктор технічних наук, доцент, директор
Інститут електромеханіки та енергоменеджменту
Одеський національний політехнічний університет

пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

E-mail: dart77@ukr.net

Контактний тел.: 067-743-47-44

Відомості про наявність друкованих творів у загальнодержавних та міжнародних базах даних: 72

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>

Boyko Andrew

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director

Electromechanics and Energy Institute

Odessa national polytechnic university

Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044

E-mail: dart77@ukr.net

Contact tel.: 067-743-47-44

Information about the availability of printed works in national and international databases: 72

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>

Волянская Яна Богдановна

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра электрооборудования судов и информационной безопасности

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

пр. Героев Украины, 9, г. Николаев, Украина, 54025

E-mail: yanavolaynskaya@gmail.com

Контактный тел.: (067) 7981870

Сведения о наличии печатных произведений в общегосударственных и международных базах данных: 34

Номер ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3010-1684>

Волянська Яна Богданівна

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра електрообладнання суден та інформаційної безпеки

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна, 54025

E-mail: yanavolaynskaya@gmail.com

Контактний тел.: (067) 7981870

Відомості про наявність друкованих творів у загальнодержавних та міжнародних базах даних: 34

Номер ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3010-1684>

Volyanskaya Yana

PhD, Associate Professor

Department of electrical equipment of courts and informative safety

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolayiv, Ukraine, 54025

E-mail: yanavolaynskaya@gmail.com

Contact tel.: (067) 7981870

Information about the availability of printed works in national and international
Databases: 34

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3010-1684>

Поштова адреса для відправки журналу:

Бойко Андрій Олександрович

Відділення Нової пошти №55 (г. Одеса, пр. Шевченка, 4е)

Контактний тел.: +38067-74-34-744

Маєвський Дмитро Андрійович

*Д.т.н, професор, завідувач кафедри теоретичних основ та загальної
електротехніки Одеського національного політехнічного університету.*

T. 0974930848

ifs@ukr.net, dmitry.a.maevsky@gmail.com

Пигнастый Олег Михайлович

Доктор технических наук, доцент

Профессор кафедры компьютерного мониторинга и логистики

*Харьковский технический университет «Харьковский политехнический
институт».*

Тел.: +380-67-572-50-29

rom7@bk.ru

Рабочий адрес: г. Харьков, ул. Пушкинская 79/2, 1 этаж