

Научная статья

DOI 10.15593/2224-9397/2022.1.10

УДК 621.316.761.2

И.А. Мальцев^{1,2}, М.Е. Тюленев², Е.А. Чабанов¹¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²ЗАО «НИПО», Пермь, Россия**КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В УЗЛЕ НАГРУЗКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА «СТАТКОМ»**

В сфере электротехники встречается большое количество разнообразных потребителей и источников. Эти потребители и источники оказывают друг на друга взаимное влияние. Это влияние проявляется в изменении величины напряжения питания и потребляемого тока. Широкое распространение получили асинхронные машины ввиду их простой конструкции, высокой надежности, возможности питания от сети трехфазного переменного напряжения, низкой стоимости. В статье рассматривается применение асинхронных машин и подтверждается целесообразность использования статического синхронного компенсатора для уменьшения нагрузки на электрическую сеть и компенсации реактивной составляющей в узле нагрузки. **Цель исследований:** рассмотрение способа компенсации реактивной мощности в узле нагрузки с использованием устройства «СТАТКом». **Методы:** исследования пусковых характеристик двух асинхронных двигателей от источников питания, параллельно которому подключается статическое устройство компенсации реактивной мощности «СТАТКом», выполнялись с применением разработанных математических моделей асинхронного двигателя, источника электропитания, устройства компенсации «СТАТКом». **Результаты:** исследования подтвердили, что при использовании «СТАТКома» напряжение сети незначительно отличалось от номинального, пусковые токи снизились и были близки к номинальным значениям, реактивная мощность двигателей увеличилась в 2 раза, уменьшилось время переходного процесса пуска асинхронных двигателей. **Практическая значимость:** анализ данных, полученных при исследованиях, а именно: время пуска, величина пускового тока и напряжения питания асинхронных двигателей, величина компенсируемой реактивной мощности, позволит в дальнейшем оптимально настраивать электроэнергетические системы, содержащие асинхронные двигатели, используемые на объектах, удаленных от источников электричества большой мощности, с целью повышения эффективности использования электросетей и электрооборудования.

Ключевые слова: «СТАТКом», асинхронная машина, электрическая сеть, компенсация реактивной мощности, пуск двигателя, переходный процесс, пусковой ток.

I.A. Malcev^{1,2}, M.E. Tyulenyov², E.A. Chabanov¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²CJSC "NIPO", Perm, Russian Federation

REACTIVE POWER COMPENSATION IN THE LOAD NODE USING A STATCOM DEVICE

In the field of electrical engineering, there are a large number of diverse consumers and sources. These consumers and sources influence each other mutually. This influence is manifested in a change in the magnitude of the supply voltage and current consumption. Asynchronous machines are widely used due to their simple design, high reliability, the ability to be powered from a three-phase alternating voltage network, and low cost. The article discusses the use of asynchronous machines and confirms the feasibility of using a static synchronous compensator to reduce the load on the electrical network and compensate for the reactive component in the load node. **The purpose of the research:** consideration of the method of reactive power compensation in the load node using the STATCom device. **Methods:** studies of the starting characteristics of two asynchronous motors from power sources, in parallel to which a static reactive power compensation device STATCom is connected, were carried out using the developed mathematical models of an asynchronous motor, power supply, compensation device STATCom. **Results:** studies have confirmed that when using STATCom, the mains voltage slightly differed from the nominal one, the starting currents decreased and turned out to be close to the nominal values, the reactive power of the motors increased by 2 times, the time of the transient start of asynchronous motors decreased. **Practical significance:** the analysis of the data obtained during the research, namely the start time, the value of the starting current and supply voltage of asynchronous motors, the value of the compensated reactive power, will allow in the future to optimally tune electric power systems containing asynchronous motors used at facilities remote from large electricity sources. capacity, in order to increase the efficiency of the use of electrical networks and electrical equipment.

Keywords: STATCom, asynchronous machine, electrical network, reactive power compensation, motor start, transient process, starting current.

Введение

В России существует проблема – значительное удаление электрических подстанций от энергетических центров. В этих системах слабые сети (большое сопротивление сети) при больших нагрузках. При рассмотрении паспортных данных учитываются заявленная мощность и напряжение, пусковой ток, который является важнейшим показателем работы любого двигателя. Большие пусковые токи вызывают падение напряжения, если источник недостаточно мощный, поэтому снижается пусковой момент двигателя, пуск затягивается или становится невозможным. Затяжной пуск приводит к повышенному нагреву. Возникает ускоренное старение изоляции, уменьшается срок эксплуатации двигателя и сети в целом [1, 2].

Обычно к одному источнику подключается несколько потребителей, которые эффективно могли бы работать до подключения электрической машины, а после ее подключения происходит уменьшение

питающего напряжения, которое отрицательно отражается на двигателе и смежных потребителях, а именно снижает их перегрузочную способность, и появляется риск выхода из рабочего состояния всей системы в целом и перехода ее в аварийный режим. Возникает потребность уменьшения пусковых токов, которые кроме активной содержат еще реактивную составляющую, не выполняющую полезную работу, а расходующую на обмен энергией между генератором и магнитным полем приемника. Чем меньше реактивной составляющей тока будет использоваться на намагничивание и чем больше активной на передачу энергии нагрузке, тем двигатель будет эффективнее использовать потребляемую энергию.

Для поиска решения указанных недостатков была исследована модель электрической сети длиной 4,5 км, передающая энергию от централизованной электросети до удаленного узла электропитания, к которому подключаются два последовательно запускаемых асинхронных двигателя (АД). К этому же узлу подключается статический компенсатор реактивной мощности, возникающей при запуске АД. Компенсатор состоит из реактора и идеализированного источника напряжения, от которого реактор, подключенный к общей сети, получает электропитание. Ток реактора будет определяться векторной суммой двух напряжений: электросети и идеализированного источника напряжения.

Таким образом, данные исследования будут представлять интерес для объектов, находящихся на удаленном расстоянии от мощных источников электрической энергии. В состав объектов может входить другое мощное оборудование, поэтому в рамках исследования будет разработан способ использования этого оборудования без возникновения критических ситуаций, которые могут нарушить нормальную работоспособность линии электропередач.

Электромагнитная совместимость сети и АД

Большое разнообразие потребителей и источников электроэнергии оказывает существенное влияние друг на друга при их взаимодействии, которое проявляется в изменении величины напряжения питания и потребляемого тока [3]. Мощные источники обеспечивают удовлетворительный уровень напряжения на холостом ходу. При подключении потребителей со значительными токами происходит уменьшение напряжения сети. Такие источники не следует использовать.

Поскольку электроподстанции могут быть значительно удалены от центральной электросети, то их относят к слабым, особенно, при больших нагрузках во время пуска двигателя. Важным параметром двигателя является пусковой ток, который больше рабочего в несколько раз, что оценивается коэффициентом кратности пускового тока $K_{\text{п}}$:

$$K_{\text{п}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{п}}$ – ток пуска, А; $I_{\text{н}}$ – номинальный ток, А.

По величине $K_{\text{п}}$, который является паспортным, определяется $I_{\text{п}}$. От конструкции двигателя зависят потребляемый ток и момент. При запуске АД коэффициент скольжения уменьшается [4, 5], поэтому и ток будет уменьшаться до величины, соответствующей нагрузке на валу.

Как отмечалось, при маломощном источнике электроэнергии и больших $I_{\text{п}}$ напряжение уменьшается и пуск электрической машины затрудняется. Поэтому из-за повышенного нагрева происходит ускоренное старение материалов, особенно изоляции, уменьшение срока эксплуатации потребителей и системы. При понижении напряжения питания появляется риск опрокидывания двигателей и потери устойчивости всей системы в целом с переходом в аварийное состояние.

Характер пусковых токов

Пусковые токи АД возникают в момент подачи напряжения и могут превышать номинальный в 5–7 раз. Пусковой ток АД имеет активную составляющую, которая не превышает двухкратного значения номинального, и реактивную, которая в 4–5 раз больше номинального.

Переменное электромагнитное поле статора индуцирует ЭДС в обмотке ротора, которая зависит от скорости изменения электромагнитного поля статора, т.е. от скольжения.

При пуске поле статора начинает вращаться сразу после подачи напряжения, а ротору требуется некоторое время для разгона. Чем мощнее и крупнее АД, тем больше времени требуется ротору для ускорения, так как увеличение массы способствует росту инерции [6].

В момент пуска величина скольжения максимальна, поэтому ЭДС и ток в цепи роторной обмотки достигают максимума.

В соответствии с теорией АД [2, 7, 8] в роторе пусковой ток большой. Он, по сути, реактивный, поэтому не обеспечивает нужный момент для запуска АД. При выходе АД на рабочую характеристику

ЭДС ротора снижается, и в работу включается активная составляющая тока. Поэтому чем меньше реактивного тока будет потребляться на намагничивание и больше активного тока на передачу энергии нагрузке, тем эффективнее АД будет использовать потребляемую энергию.

Деление тока на активную и реактивную составляющую условное [9]. В сети течет один ток (одна мощность), а в нагрузке она используется для разных целей. Активная – на полезную работу. Реактивная мощность характеризует быстрдействие обмена энергией между генератором и магнитным полем потребителя.

Реактивная мощность оказывает негативное влияние на работу электросети: возникают потери электроэнергии, уменьшается $\cos\varphi$, увеличиваются потери напряжения во всех частях энергосистемы, уменьшается частота вращения электродвигателей, уменьшается пропускная способность сети, напряжение отклоняется от номинального.

Компенсация реактивной мощности – самый оптимальный способ снижения используемой из сети реактивной мощности.

Пути ограничения и компенсации реактивной мощности

Компенсация реактивной мощности – это комплекс мероприятий, который устанавливает баланс реактивной мощности в системе, позволяющий снижать потери электроэнергии, для чего используются различные устройства, компенсирующие реактивную мощность [10].

Компенсация реактивной мощности позволяет: снизить расходы на электроэнергию, уменьшить нагрузку на сеть распределения, увеличить время работы сетей, уменьшить потери тепла, снизить влияние гармоник, особенно высокочастотных, уменьшить несимметрию фаз; снизить затраты на обслуживание электросети, увеличить надежность электрической системы. В электросистемах компенсация позволяет: разгрузить сеть от вредоносной энергии; уменьшить затраты на ремонт электросети; увеличить пропускную способность электросети.

Таким образом, компенсируя реактивную составляющую тока двигателя, можно уменьшить величину пусковых токов.

Для компенсации реактивной мощности используются: батареи статических конденсаторов, фильтрокомпенсирующее устройство, синхронный компенсатор, статический синхронный генератор, тиристорно-реакторная группа, шунтирующий реактор, статический тиристорный компенсатор, статический генератор реактивной мощности, управляе-

мый шунтирующий реактор с подмагничиванием, синхронный статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения – «СТАТКом».

Сравнительный анализ всех способов компенсации показал, что использование устройства «СТАТКом» для компенсации реактивной мощности является наиболее оптимальным и простым.

«СТАТКом» применяется для выполнения следующих задач: регулирование напряжения; компенсация реактивной мощности; потребление активной мощности из одной фазы и выдача ее в другую; сглаживание колебаний в энергетических системах при высоком быстродействии.

Преимущества использования: универсальность; при запуске системы происходит минимальное воздействие на сеть; компенсация реактивной мощности протекает в большом диапазоне; регулируется в емкостном и в индуктивном диапазоне; высокая скорость отклика системы управления; минимальные габариты в сравнении с аналогами; высокая эффективность; высокая надежность с автоматическим шунтированием поврежденного последовательного модуля.

Основной недостаток устройства «СТАТКом» – высокая стоимость.

Что такое «СТАТКом» и как он работает

Статический синхронный компенсатор (СТАТКом) или static synchronous compensator (STATCOM) – это устройство на базе статического преобразователя, способного статически компенсировать реактивную мощность, емкостный или индуктивный выходной ток которого может изменяться независимо от напряжения сети. «СТАТКом» регулирует реактивную мощность в широких пределах ($\pm 100\%$).

«СТАТКом» подключается через трансформатор параллельно линии в узле сети. Физика процессов, протекающих в «СТАТКоме», посредством векторных диаграмм наглядно продемонстрирована в [11–13].

Основные элементы, из которых состоит «СТАТКом» на примере однолинейной схемы реализации подключения также подробно рассмотрены в [11–13]. Ключевым элементом компенсатора как управляемого инвертора является биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT). Для снижения искажений при осуществлении компенсации реактивной мощности на выходе «СТАТКома» генерируется соответствующее гармоническое напряжение. Использование «СТАТКома» позволяет компенсировать реактивную мощность, а следовательно,

уменьшать пусковые токи двигателей, поэтому подтверждается необходимость его применения в объектах, удаленных от энергоузлов [14].

Для решения поставленной задачи была исследована модель электрической сети длиной 4,5 км, позволяющая передавать энергию от центральной электросети до удаленного узла электроэнергии, к которому подключены два последовательно запускаемых АД и «СТАТКом». Ток реактора определялся векторной суммой двух напряжений: сети и идеализированного источника.

Математическая модель АД

Электрическая машина математически описывается базовыми уравнениями баланса напряжения для всех электрических контуров. В АД традиционной конструкции обмотка статора трехфазная, а короткозамкнутого ротора – многофазная в виде обмотки «беличья клетка», поэтому для анализа переходных процессов существует несколько видов моделей. В АД присутствуют несколько электрических контуров, связанных между собой. Переходные процессы в машине описываются системой дифференциальных уравнений [15]. В данных исследованиях используется модель идеализированной двухфазной электрической машины для упрощения исходных дифференциальных уравнений. Пространственная модель обобщенной машины с гармонически изменяющимся полем круговой формы представлена в [2, 7, 8].

Трехфазную систему уравнений (4) посредством преобразования координат заменяют системой α - β . Получают идеализированную модель АД, имеющего по две обмотки на статоре и роторе, расположенные по ортогональным осям α - β . Двухфазной системой уравнений (5) оперировать легче, чем трехфазной [7, 16]. При исследовании влияния АД и «СТАТКома» на сеть воспользуемся системой координат α - β , жестко связанной со статором. Тогда значение тока ротора не требуется.

Математическая модель на базе дифференциальных уравнений отражает процессы электрической машины [8], в которой переходные процессы сложнее установившихся. К ним относятся изменения U , частоты, нагрузки на валу, т.е. включение и выключение двигателя, реверс, короткое замыкание, изменение нагрузки. На практике переходные процессы протекают при одновременном изменении нескольких факторов [17]. К ним также добавляется влияние динамики [18].

Для исследований использовался АД с двойной «беличьей клеткой» марки АД 4АЗМП-5000/6000 УХЛ4.

Напряжение по осям α и β при заданном линейном действующем напряжении $U_s = 6000$ В определялось по формулам:

$$U_\alpha = U_s \cos = \frac{6000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin \left(314 + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2)$$

$$U_\beta = U_s \sin = \frac{6000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin(314). \quad (3)$$

Для составления математической модели АД была взята система уравнений баланса напряжений.

В 3-фазной системе 6 уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{As}}{dt} &= u_{As} - R_s \cdot i_{As}, \\ \frac{d\psi_{Bs}}{dt} &= u_{Bs} - R_s \cdot i_{Bs}, \\ \frac{d\psi_{Cs}}{dt} &= u_{Cs} - R_s \cdot i_{Cs}, \\ \frac{d\psi_{Ar}}{dt} &= (-\omega \cdot \psi_{Br}) \cdot p - R_r \cdot i_{Ar}, \\ \frac{d\psi_{Br}}{dt} &= (\omega \cdot \psi_{Cr}) \cdot p - R_r \cdot i_{Br}, \\ \frac{d\psi_{Cr}}{dt} &= (\omega \cdot \psi_{Ar}) \cdot p - R_r \cdot i_{Cr}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В 2-фазной системе 4 уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} &= u_{\alpha s} - R_s \cdot i_{\alpha s}, \\ \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} &= u_{\beta s} - R_s \cdot i_{\beta s}, \\ \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} &= (-\omega \cdot \psi_{\beta r}) \cdot p - R_r \cdot i_{\alpha r}, \\ \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} &= (\omega \cdot \psi_{\alpha r}) \cdot p - R_r \cdot i_{\beta r}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Оперировать меньшим количеством уравнений легче.

В независимой системе координат статора и ротора получаем уравнения обобщенной электрической машины.

Каждая обмотка описывается уравнениями баланса напряжений:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha s} &= \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} + R_s \cdot i_{\alpha s}, \\ u_{\beta s} &= \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} + R_s \cdot i_{\beta s}, \\ u_{\alpha r} &= \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} + R_r \cdot i_{\alpha r}, \\ u_{\beta r} &= \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} + R_r \cdot i_{\beta r}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Потокосцепления определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{as} &= L_{as} \cdot i_{as} + l_{as\alpha r} \cdot i_{\alpha r} + l_{as\beta r} \cdot i_{\beta r}, \\ \Psi_{\beta s} &= L_{\beta s} \cdot i_{\beta s} + l_{\beta s\alpha r} \cdot i_{\alpha r} + l_{\beta s\beta r} \cdot i_{\beta r}, \\ \Psi_{\alpha r} &= L_{\alpha r} \cdot i_{\alpha r} + l_{\alpha r\alpha s} \cdot i_{\alpha s} + l_{\alpha r\beta s} \cdot i_{\beta s}, \\ \Psi_{\beta r} &= L_{\beta r} \cdot i_{\beta r} + l_{\beta r\alpha s} \cdot i_{\alpha s} + l_{\beta r\beta s} \cdot i_{\beta s}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где L – собственные индуктивности обмоток; l – взаимные индуктивности обмоток.

Собственные индуктивности обмоток постоянны ($L = \text{const}$) при постоянстве воздушного зазора и ненасыщения магнитной цепи АД.

Синусоидальное распределение магнитодвижущей силы и симметрии машины позволяют записать равенство:

$$\left. \begin{aligned} l_{as\alpha r} &= l_{\alpha ras} = l_{\beta s\beta r} = l_{\beta r\beta s} = L_m \cdot \cos \gamma, \\ l_{as\beta r} &= l_{\beta ras} = l_{\beta s\alpha r} = l_{\alpha r\beta s} = L_m \cdot \sin \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где γ – угол между осями статора и ротора (угол положения ротора); L_m – коэффициент взаимной индукции при совпадении осей обмоток.

Система уравнений, состоящая из потокосцеплений системы α – β :

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{as} &= L_s \cdot i_{as} + 0 \cdot i_{\beta s} + L_m \cdot i_{\alpha r} + 0 \cdot i_{\beta r}, \\ \Psi_{\beta s} &= 0 \cdot i_{as} + L_s \cdot i_{\beta s} + 0 \cdot i_{\alpha r} + L_m \cdot i_{\beta r}, \\ \Psi_{\alpha r} &= L_m \cdot i_{as} + 0 \cdot i_{\beta s} + L_r \cdot i_{\alpha r} + 0 \cdot i_{\beta r}, \\ \Psi_{\beta r} &= 0 \cdot i_{as} + L_m \cdot i_{\beta s} + 0 \cdot i_{\alpha r} + L_r \cdot i_{\beta r}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Согласно второму закону Ньютона, для вращательного тела уравнение движения ротора определяется формулой:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_e - M_c}{J}, \quad (10)$$

где J – эквивалентный момент инерции привода; M_c – статический момент (момент сопротивления); M_e – электромагнитный момент электрической машины. Выражается через потокосцепление и токи:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega, \quad (11)$$

где ω – циклическая частота;

$$M_e = (\Psi_{as} \cdot i_{\beta s} - \Psi_{\beta s} \cdot i_{as}) \cdot p, \quad (12)$$

$$M_c = M_{c0} + k_{mc} \cdot \omega^2 \cdot \text{sign}(\omega). \quad (13)$$

Система уравнений, характеризующая переменное напряжение:

$$u_{as} = U_x \cos = \frac{6000\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin\left(314 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (14)$$

$$u_{\beta s} = U_x \sin = \frac{6000\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin(314). \quad (15)$$

На основе дифференциальных уравнений была построена модель АД для исследования переходных процессов (рис. 1).

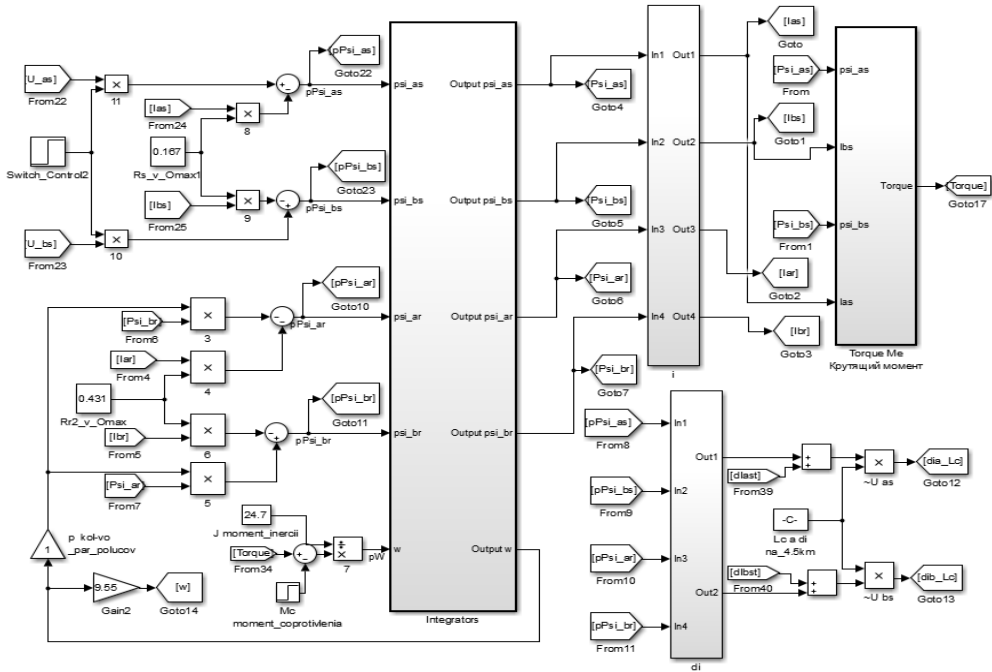


Рис. 1. Математическая модель АД марки 4А3МП-5000/6000

Математическая модель источника напряжения

Источник синусоидального напряжения – это источник напряжения, изменяющийся по гармоническому закону согласно уравнению:

$$u(t) = U_0 \sin(t + \omega), \quad (16)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения; U_0 – амплитудное значение напряжения; ω – циклическая частота колебания напряжения.

Напряжение сети выражается по формуле:

$$U_c = e - R_c \cdot i_c - L_c \frac{di_c}{dt}, \quad (17)$$

где U_n – напряжение источника; e – ЭДС источника сети; R_c – активная составляющая сопротивления сети; i_c – ток сети; $L_c \frac{di_c}{dt}$ – реактивная составляющая сопротивления сети.

Реализация указанной модели представлена на рис. 2. Модель источника напряжения максимально приближена к реальному источнику напряжения, она учитывает величину ЭДС и падение напряжения.

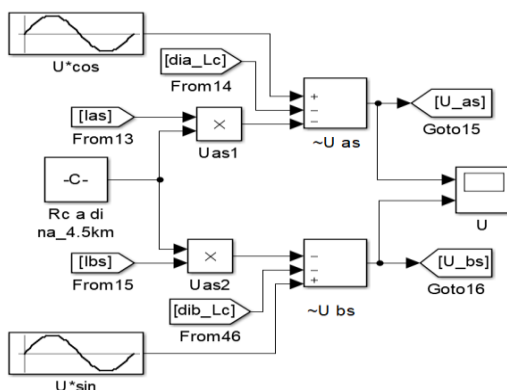


Рис. 2. Модель источника напряжения

Математическая модель устройства «СТАТКом»

По причине сложности реализации математической модели «СТАТКом» были приняты допущения: математическая модель представляет собой реактор и идеализированный источник напряжения.

ЭДС такого источника определяется по формуле:

$$e = U_c + R_c \cdot i_c + L_c \frac{di_c}{dt}, \quad (18)$$

где U_c – напряжением сети; R_c – активная составляющая сопротивления сети; i_c – ток сети; $L_c \frac{di_c}{dt}$ – реактивная составляющая напряжения сети.

Напряжение формируется по синусоидальному закону идеализированным синусоидальным источником регулируемого напряжения.

Ток сети i_c – сумма токов всех подключенных потребителей:

$$i_c = i_{ад1} + i_{ад2} + \dots + i_{статком}. \quad (19)$$

Идеализированный источник – сеть бесконечной мощности, в которой нет внутренних потерь напряжения. Если учитывать формулу выше, то $R_c = 0$ и $L_c = 0$, следовательно, справедливо следующее:

$$e = U_{и}. \quad (20)$$

Напряжение сети идеализированного источника $U_{и}$ равна ЭДС e .

Уравнение «СТАТКома» имеет следующий вид:

$$U_c \pm U_{и} = R_k \cdot i_k - L_k \frac{di_k}{dt}, \quad (21)$$

где $U_{и}$ – напряжение идеализированного источника; U_c – напряжение сети; R_k – активное сопротивление компенсатора; i_k – ток компенсатора; $L_k \frac{di_k}{dt}$ – реактивная составляющая напряжения компенсатора.

Модель реализации «СТАТКома» представлена на рис. 3.

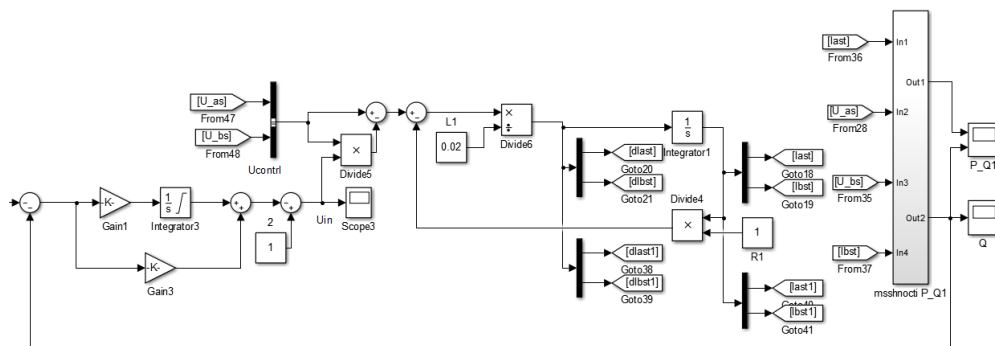


Рис. 3. Модель устройства «СТАТКом»

Исследование источника напряжения без нагрузки

На рис. 4 представлена модель идеализированного синусоидального источника с регулируемой амплитудой напряжения [19–21].

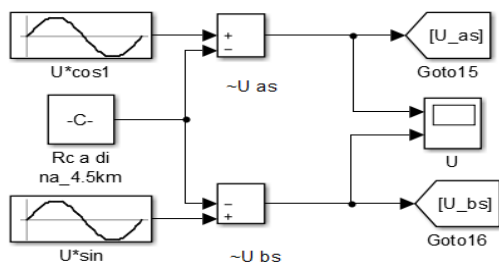


Рис. 4. Модель источника напряжения без нагрузки

График напряжения, полученного разработанной моделью источника питания, представлен на рис. 5.

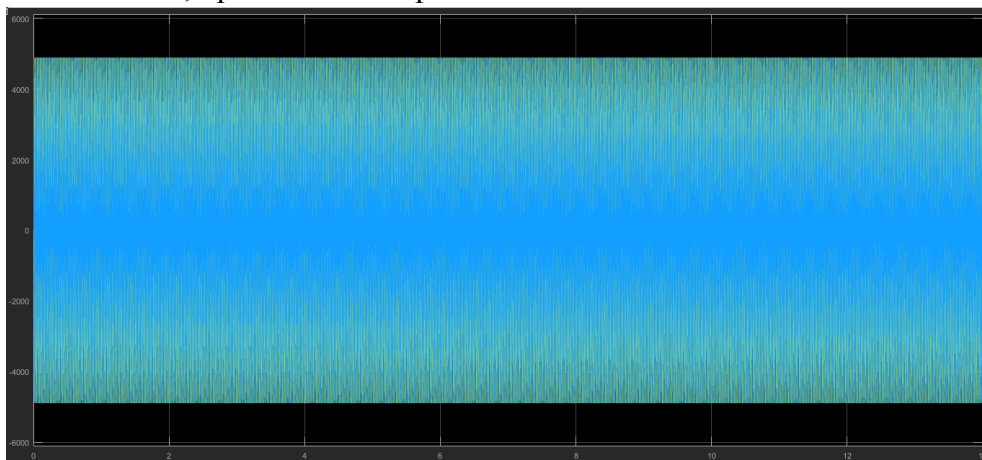


Рис. 5. График напряжения идеализированного источника

Напряжение на всем протяжении моделирования будем считать постоянным по причине отсутствия нагрузки на сеть.

Исследование цепи с источником напряжения и двумя последовательно запускаемыми АД

На рис. 6 представлена реальная структурная схема обобщенной электрической сети с двумя АД.

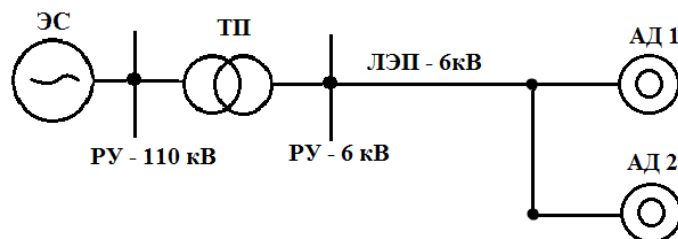


Рис. 6. Реальная структурная схема электрической системы:
ЭС – электрическая станция, ТП – трансформаторная подстанция,
АД – асинхронный двигатель, ЛЭП – линия электропередач

В связи со сложностью реализации структурная схема была упрощена (рис. 7). Источник напряжения, представленный на данном рисунке, учитывает электрическую станцию, трансформаторную подстанцию и линию электропередач длиной 4,5 км [5]. Для проведения исследований упрощенной схемы (см. рис. 7) собирается модель из идеализированного источника напряжения (см. рис. 2) и двух АД (см. рис. 1), запускаемых последовательно друг за другом.

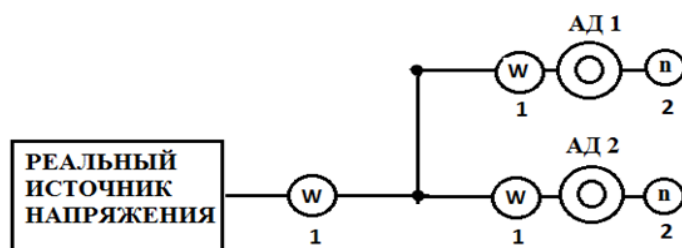


Рис. 7. Упрощенная схема электросети с двумя АД:
1 – осциллограф, 2 – тахометр

Запуск первого АД производится без нагрузки на 1-й секунде моделирования, наброс нагрузки – на 6-й секунде. Запуск второго АД без нагрузки – на 8-й секунде, нагружается двигатель – на 13-й секунде. График напряжения сети представлен на рис. 8. Время пуска первого

АД 4,25 с, время пуска второго АД 4,7 с. На источнике электроэнергии формируется напряжение 5000 В, которое эквивалентно 100 % для удобства сравнения в дальнейшем. Согласно графику до включения первого АД к нему прикладывается напряжение 4900 В (98 %). Уменьшение напряжения сети на 2 % связано с наличием в ней сопротивлений, т.е. потерями при передаче энергии от источника до двигателя.

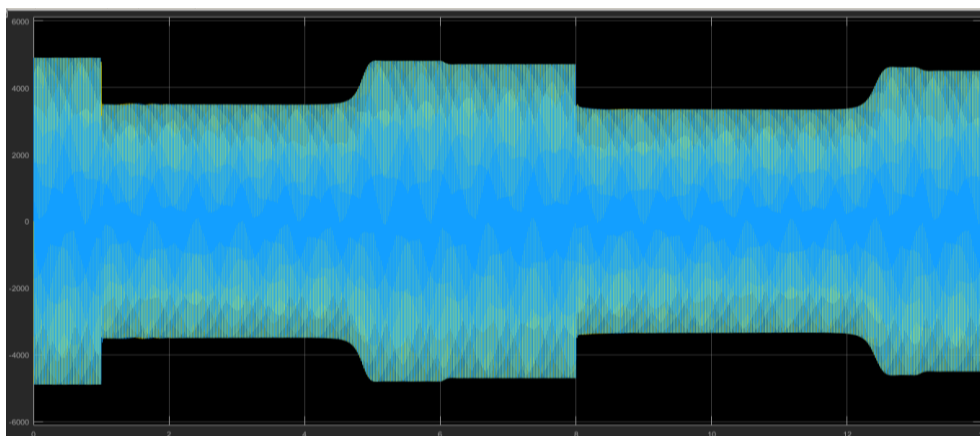


Рис. 8. График напряжения сети с двумя АД

При запуске первого АД происходит резкое уменьшение напряжения питающей сети от 4900 В (98 %) до 3500 В (70 %). Это связано с пуском АД, в результате которого возрастают токи, уменьшается напряжение сети. С 4,3 с происходит восстановление напряжения, к 5,25 с моделирования напряжение восстанавливается до уровня 4800 В (96 %), это свидетельствует о завершении переходного процесса пуска первого АД. После 6-й секунды моделирования напряжение падает до уровня 4700 В (94 %) по причине подключения нагрузки к двигателю.

При запуске второго АД на 8-й секунде наблюдаем резкое снижение напряжения от 4700 (96 %) до 3350 В (67 %). С 12-й секунды наблюдаем восстановление напряжения. К 12,6 с моделирования напряжение восстанавливается до 4620 В (92,4 %), что свидетельствует о завершении переходного процесса. После 13-й секунды происходит снижение напряжения до 4500 В (95,8 %) по причине приложения нагрузки к валу второго АД. Следовательно, при включении АД в сеть происходит уменьшение напряжения сети, и с дополнительно включенным АД оно уменьшается все больше. При подключении одного и более АД сеть больше нагружается, поэтому напряжение сети будет больше уменьшаться.

Исследование цепи с источником напряжения, «СТАКомом» и двумя последовательно запускаемыми АД

На рис. 9 представлена упрощенная структурная схема обобщенной электросети с двумя АД и «СТАКомом» [22, 23].

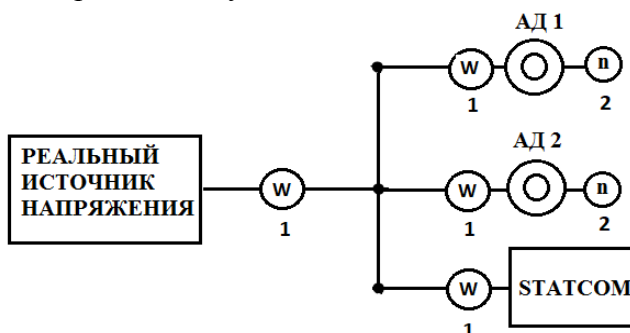


Рис. 9. Упрощенная структурная схема с двумя АД и «СТАКомом»: 1 – осциллограф, 2 – тахометр

Для проведения исследований упрощенной схемы (см. рис. 9) собирается модель из идеализированного источника напряжения (см. рис. 2), двух последовательно запускаемых АД (см. рис. 1) и «СТАКкома» (см. рис. 3).

Повторяется последовательный запуск двигателей и фиксируется график напряжения сети, представленный на рис. 10.

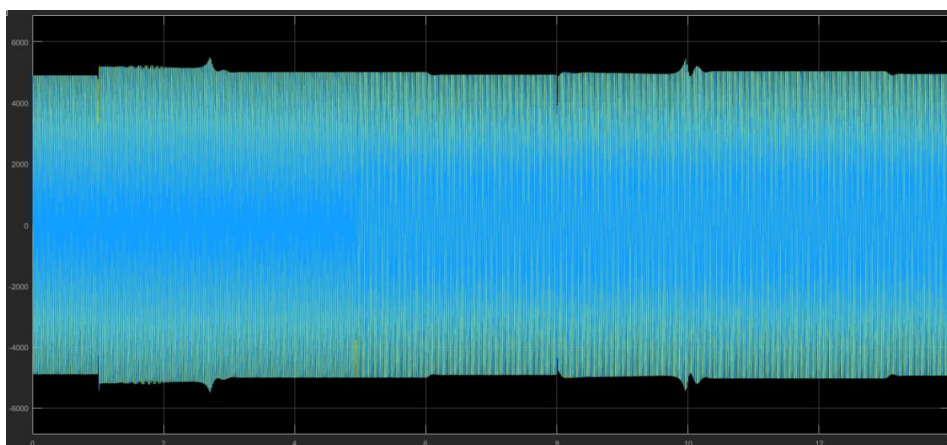


Рис. 10. График напряжения сети «СТАКкома» и двух АД

Время пуска первого АД 2,15 с (было 4,25 с), время пуска второго АД 2,4 с (было 4,7 с).

При запуске первого АД кратковременное уменьшение напряжения от 4900 (98 %) до 3300 В (66 %) длится 0,02 с. Затем происходит рост напряжения до 5200 В (104 %), а в конце переходного процесса напряжение равно 5500 В (110 %). Далее наблюдаем нестабильное напряжение, и к 3-й секунде моделирования происходит установление напряжения на уровне 5000 В (100 %). После 6-й секунды напряжение падает до 4920 В (98,4 %) по причине приложения нагрузки к первому АД.

При запуске второго АД на 8-й секунде наблюдаем резкое уменьшение напряжения от 4920 (98,4 %) до 3630 В (72,6 %). Этот процесс длится 0,02 с, далее происходит восстановление напряжения до 5000 В (100 %). Во время переходного процесса наблюдаем нестабильное напряжение, длящееся 2,4 с. Процесс завершается выходом на напряжения 5030 В (100,6 %). После 13-й секунды напряжение падает до 4910 В (98,2 %) по причине приложения нагрузки ко второму АД.

Следовательно, кратковременное снижение напряжения произошло на меньшую величину, чем было ранее в схеме без «СТАТКома». Переходный процесс длился в 2 раза быстрее при реализации данной схемы. В схеме со «СТАТКомом» при запуске первого АД возникает перенапряжение величиной 300 В и длительностью 2 с. При запуске второго АД такой перекompенсации нет. Длительность работы АД при повышенном напряжении не окажет существенного воздействия на тепловой режим двигателя по причине скоротечности процесса.

Анализ механических характеристик двигателей и нагрузки

После реализации схемы включения двух АД, идеализированного источника напряжения без компенсатора Q были получены графики угловой скорости, крутящего момента M_e на первом АД (рис. 11).

При запуске первого АД наблюдается нестабильность крутящего момента. Это связано с уменьшением напряжения сети и началом переходного процесса в интервале времени 1–5 с. На графике наблюдаем запуск АД и выход его на рабочую характеристику угловой скорости 3000 об/мин. После 6-й секунды происходит уменьшение скорости с 3000 (100 %) до 2970 об/мин (99 %) по причине приложения нагрузки к валу второго АД.

Запуск второго АД отражается на первом, его M_e начинает колебаться, значение скорости уменьшается с 2970 (99 %) до 2945 об/мин (98,2 %).

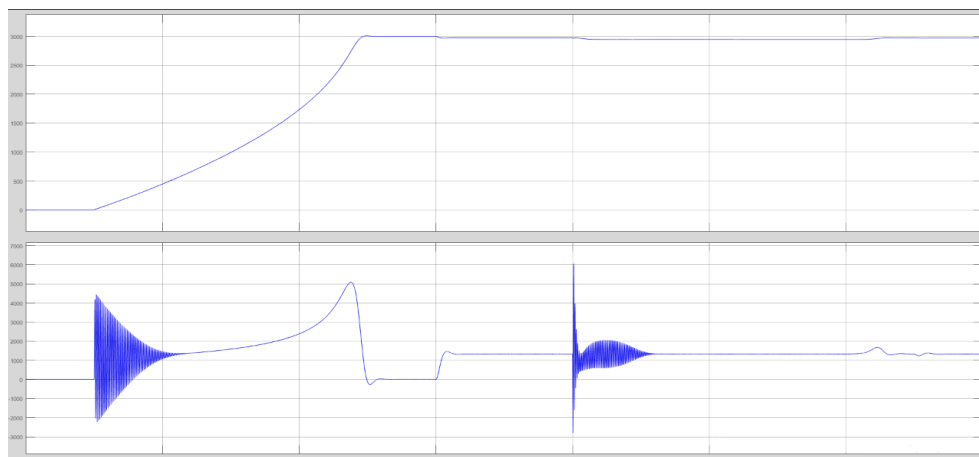


Рис. 11. График угловой скорости и крутящего момента M_e первого АД

Графики ω и M_e второго АД представлены на рис. 12.

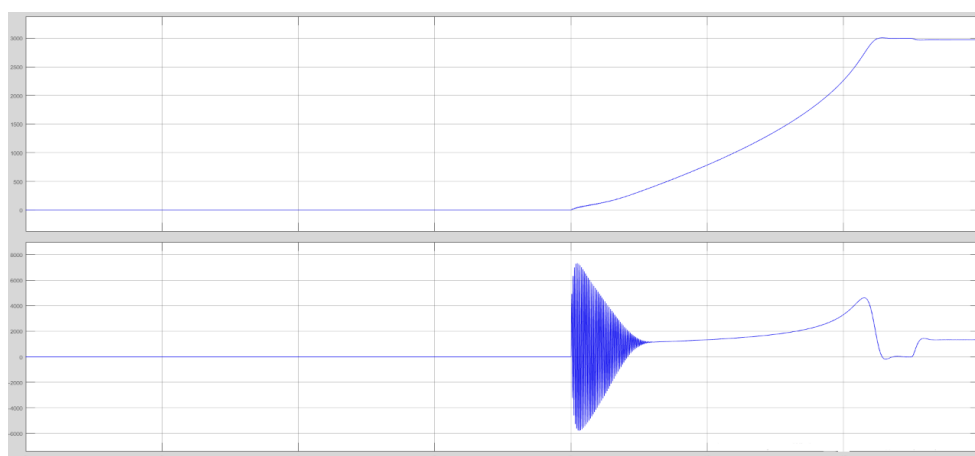


Рис. 12. График угловой скорости и крутящего момента M_e второго АД

Пуск второго АД осуществляется после 8-й секунды. Переходный процесс длится 4,7 с. При завершении переходного процесса происходит выход скорости на уровень 3000 об/мин. После 13-й секунды наблюдаем уменьшение значения скорости до 100 об/мин (1 %) в связи с приложением рабочей нагрузки на вал второго АД.

На следующем графике (рис. 13) представлены токи статора первого АД по ортогональным осям α - β . Номинальный ток АД составляет 447 А (100 %), а при запуске, на статоре появляются большие токи порядка 910 А (203,6 %). Связано это с появлением больших пусковых токов (в основном реактивных).

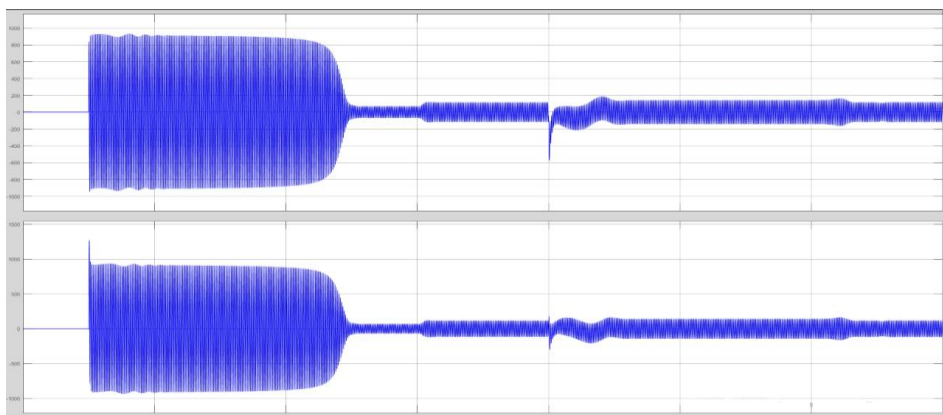


Рис. 13. График токов статора по осям α - β первого АД

На 8-й секунде происходит завершение переходного процесса, токи устанавливаются на значениях 70 А (15,7 %), после подачи нагрузки значение тока увеличивается до 115 А (25,7 %). Токи первого АД отреагировали на изменение напряжения, которое изменилось по причине запуска второго. После запуска второго АД ток на первом увеличился до значения 140 А (31,3 %), но после подачи на вал второго АД рабочей нагрузки вернулся к уровню 115 А (25,7 %), что соответствовало рабочему режиму до запуска второго АД.

На рис. 14 представлены токи статора по осям α - β второго АД.

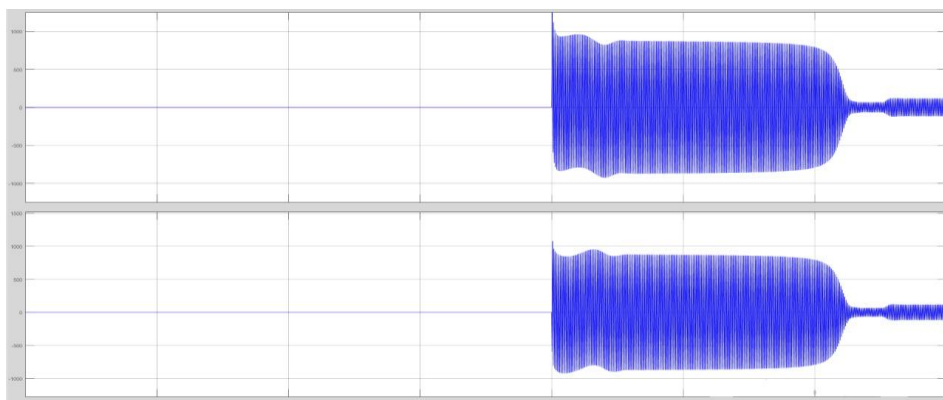


Рис. 14. График токов статора по осям α - β второго АД

При запуске второго АД наблюдаем кратковременный скачок до 1400 А (313,2 %), длящийся 0,001 с. Переходный процесс протекал на уровне 880 А (196,9 %), а при его завершении токи снизились до 67 А (15 %). При подключении нагрузки ко второму АД ток установился на

значении 120 А (26,9 %). В итоге при запуске двигателя резко увеличивается значение тока, этим объясняется уменьшение напряжения. Запуск второго АД оказывает большое влияние на токи первого.

На рис. 15 показаны активная, реактивная мощности первого АД.

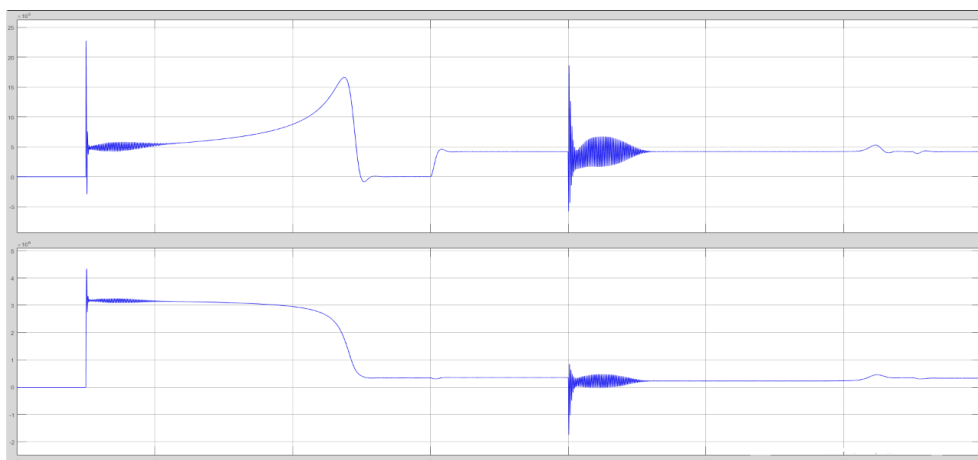


Рис. 15. График активной P и реактивной Q мощностей первого АД

Реактивная мощность больше активной на порядок. При пуске $P = 25 \cdot 10^5$ Вт, этот рост мощности длится менее 0,01 с. В момент пуска реактивная мощность достигла $Q = 5 \cdot 10^6$ Вар, процесс длится 0,005 с, но снижение значения происходит незначительно, до уровня $Q = 3 \cdot 10^6$ Вар, и остается постоянным до завершения переходного процесса. При завершении переходного процесса P близко к нулю, а $Q = 3,3 \cdot 10^5$ Вар. После нагрузки первого АД активная мощность начинает расходоваться и становится равной $P = 4,2 \cdot 10^5$ Вт, реактивная остается на прежнем уровне. После нагрузки второго АД также наблюдается переходный процесс и на первом АД.

На рис. 16 показаны активная и реактивная мощности второго АД, на которых виден рост активной мощности $P = 23 \cdot 10^5$ Вт, длящийся 0,005 с. Реактивная мощность $Q = 4,9 \cdot 10^6$ Вар действует в течение 0,005 с и снижается до уровня $Q = 3 \cdot 10^6$ Вар, оставаясь постоянной до конца переходного процесса. По окончании переходного процесса активная мощность P падает до нуля, а $Q = 3,3 \cdot 10^5$ Вар. После подачи на АД нагрузки активная мощность начинает расходоваться и устанавливается на уровне $P = 4,2 \cdot 10^5$ Вт, а реактивная остается на прежнем уровне.

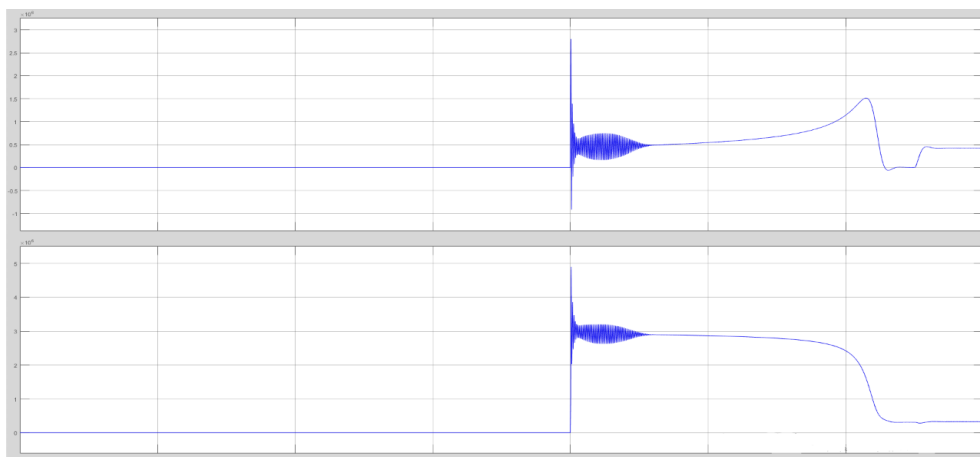


Рис. 16. График активной P и реактивной Q мощностей второго АД

На рис. 17 представлены сумма токов статора, протекающих через источник в системе координат α - β .

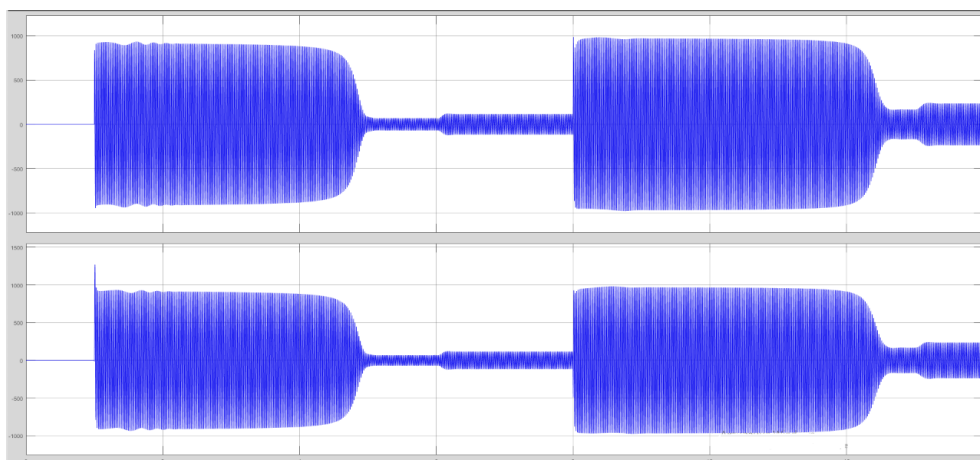


Рис. 17. Сумма токов в системе координат α - β

После запуска первого АД токи установились на значениях 910 А (203 %), переходный процесс завершился с токами 70 А (15,7 %).

При подаче нагрузки на первый АД ток вырос до 116 А (26 %). При запуске второго АД сумма токов установились на значениях 966 А (222,8 %), а в конце переходного процесса токи уменьшились до 170 А (38 %). При подаче нагрузки на второй АД ток стал равен 235 А (52,6 %).

На рис. 18 представлена суммарная величина токов статора обоих АД. Для удобства восприятия был произведен переход из двухфазной в трехфазную систему координат. Переход позволил приблизиться к физической сущности реального АД.

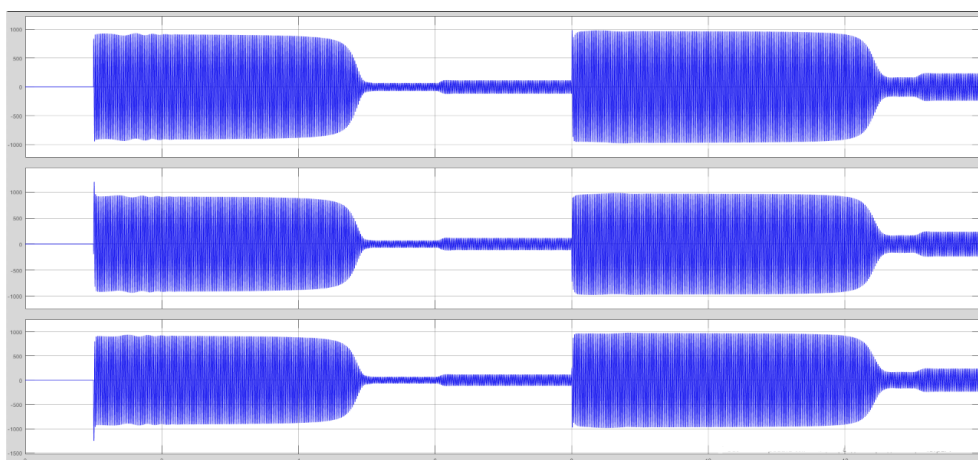


Рис. 18. График суммы токов статора двух АД в трехфазной системе координат

Анализ механических характеристик АД и нагрузки с использованием устройства «СТАТКом»

После реализации схемы включения двух АД, идеализированного источника напряжения и «СТАТКома» были получены графики угловой скорости ω и крутящего момента M_e на первом АД (рис. 19).

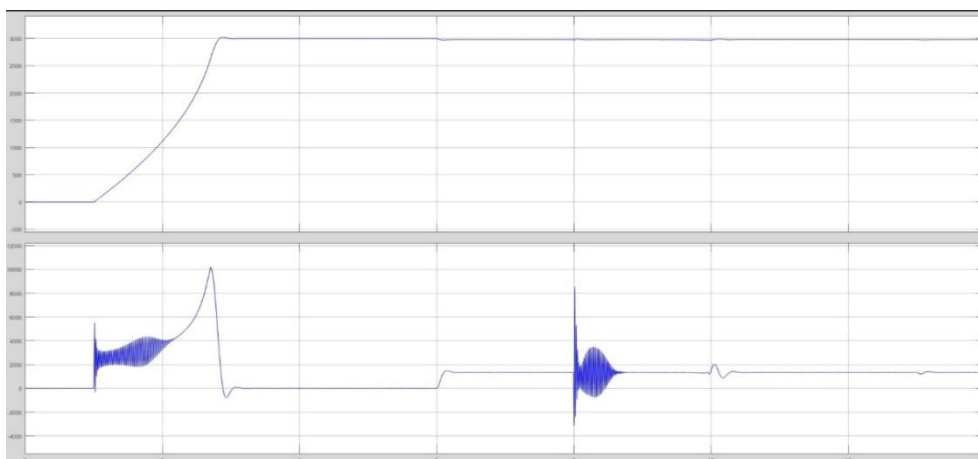


Рис. 19. График угловой скорости ω и крутящего момента M_e первого АД с использованием «СТАТКом»

При запуске первого АД наблюдаем переходный процесс, длящийся 2,15 с. На 3-й секунде моделирования скорость вращения составила 3000 об/мин. После 6-й секунды наблюдается уменьшение значения скорости вращения на 0,8 % в связи с подачей на первый АД рабочей нагрузки. При набросе нагрузки скорость вращения снизилась на меньшее значение, в сравнении со схемой без СТАТКома, также система с использованием СТАТКома выглядит более устойчивой.

Запуск второго АД оказывает меньшее влияние на M_e первого. Влияние второго АД на скорость вращения первого в данном случае практически не оказывается, поэтому ω остается на прежнем уровне.

График ω и M_e на втором АД с использованием «СТАТКома» представлен на рис. 20. Переходный процесс длится 2,4 с, а на 13-й секунде вал нагружается, поэтому уменьшается значение ω .

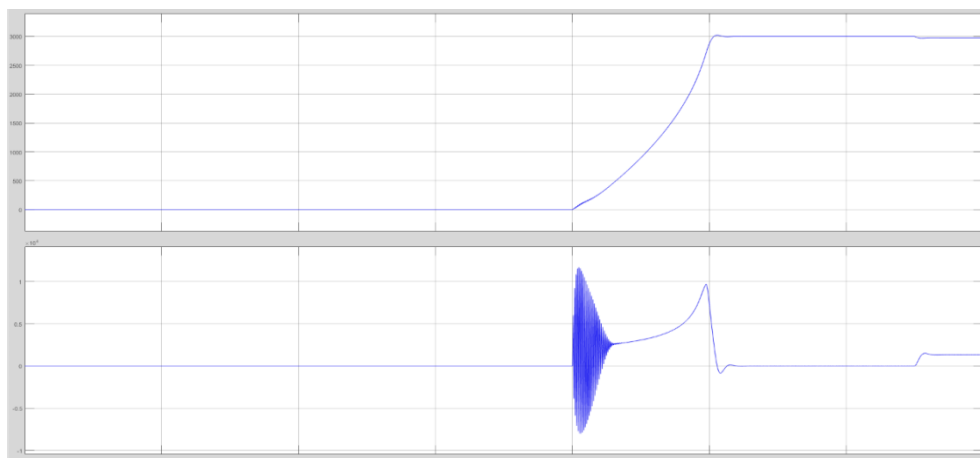


Рис. 20. Угловая скорость ω и крутящий момент M_e второго АД с использованием «СТАТКома»

На следующем графике представлены токи статора по осям α - β с использованием устройства «СТАТКом» (рис. 21).

При запуске первого АД на статоре появляется ток 1350 А (302 %), однако переходный процесс завершается гораздо быстрее, чем в схеме без «СТАТКома». После окончания переходного процесса токи установились на значении 73 А (16,3 %), после подачи на АД нагрузки ток составил 115 А (25,7 %), как в схеме без «СТАТКома». Запуск второго АД влияет на токи первого, но в меньшей степени, кратковременный скачок тока первого АД и нахождение его в неустойчивом положе-

нии работы были меньше на 0,5 с и по времени заняли 0,7 с, а после запуска второго АД ток увеличился до значения 120 А (26,9 %).

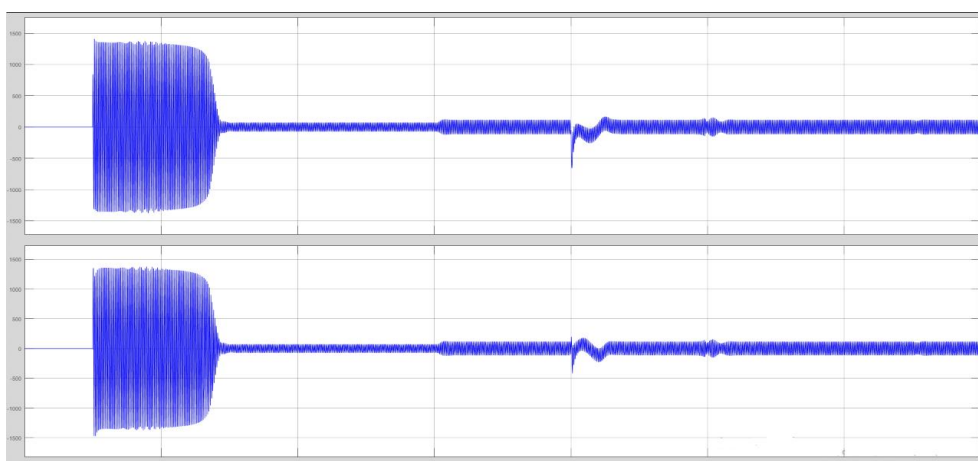


Рис. 21. Токи статора по осям α - β первого АД с использованием СТАТКома

На рис. 22 представлен график токов статора второго АД по осям α - β . При запуске второго АД наблюдается кратковременный скачок тока до 1500 А (273,7 %), длящийся 0,03 с, а затем ток волнообразными движениями уменьшился до 1300 А (237,2 %). При выходе на рабочий режим ток статора становится равным 73 А (16,3 %), а после нагрузки АД установился на уровне 115 А (25,7 %). Переходный процесс проходит быстрее, но величина токов при этом увеличилась.

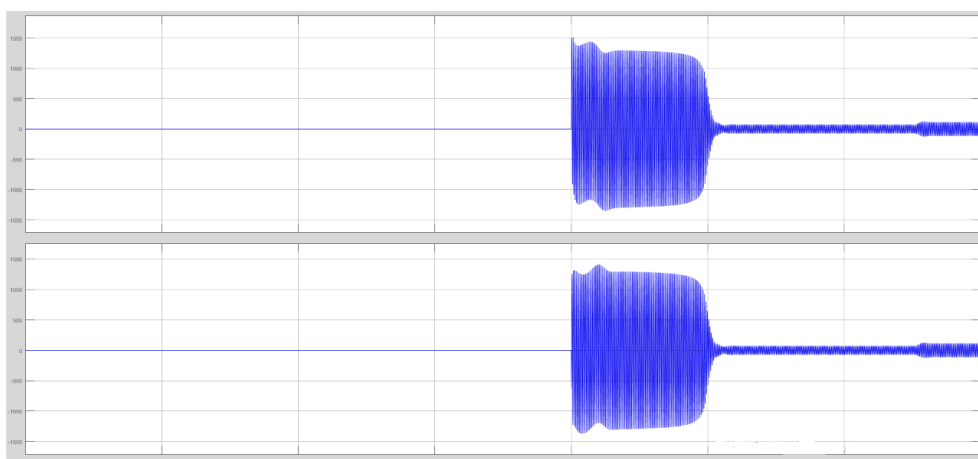


Рис. 22. Токи статора по осям α - β второго АД с использованием СТАТКома

На рис. 23 представлены токи статора и «СТАТКома» в ортогональной системе координат α - β .

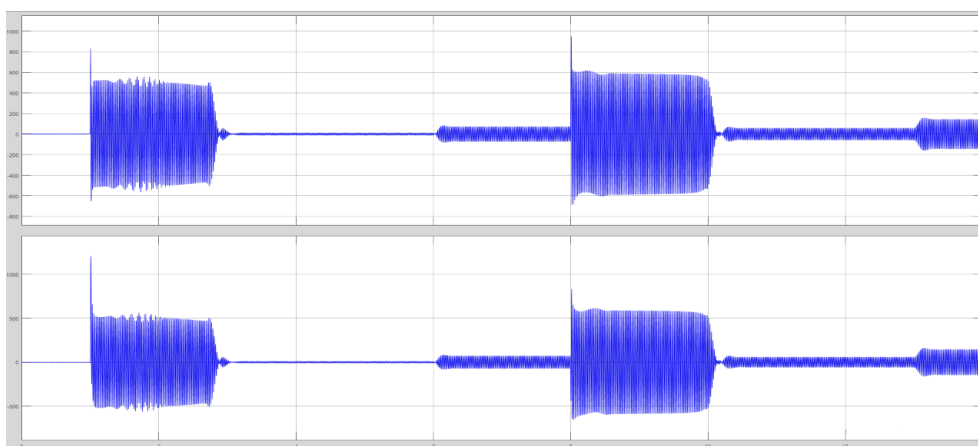


Рис. 23. Сумма токов статора и «СТАТКома» в ортогональной системе координат α - β

После запуска первого АД наблюдается кратковременный скачок тока до 1200 А (219 %), длящийся 0,0002 с, после чего ток установился на значении 500 А (111,9 %), что на 400 А (89,5 %) меньше, чем в прошлой схеме. При выходе на рабочую характеристику токи установились на значении 10 А (2,3 %), что меньше прошлого значения на 60 А (13 %), а при подаче нагрузки на АД равняются 70 А (15,7 %), что на 46 А (10,3 %) меньше, чем в схеме без компенсатора. При запуске второго АД наблюдаем кратковременный скачок тока до 950 А (212,5%), длящийся 0,0002 с, после чего он установился на значении 590 А (132 %), что на 370 А (82,8 %) меньше, чем в схеме без компенсатора. При завершении переходного процесса токи стали равны 60 А (13,4 %), что на 110 А (24,6 %) меньше, чем в прошлой схеме. При подаче нагрузки на вал второго АД ток достигает значения 145 А (32,4 %), что на 90 А (20,1 %) меньше прошлого значения.

На рис. 24 представлены графики активной, реактивной мощности, выделяющейся при работе первого АД. В момент пуска активная мощность не увеличилась в сравнении со схемой без «СТАТКома», но рост произошел во время самого переходного процесса и в конце стал равен $P = 34 \cdot 10^5$ Вт. Наблюдалось увеличение реактивной мощности до $Q = 7,5 \cdot 10^6$ Вар. Кратковременный процесс длился 0,002 с. После окончания переходного процесса P падает до нуля, а $Q = 3,6 \cdot 10^5$ Вар,

что больше на $0,3 \cdot 10^5$ Вар, чем в схеме без «СТАТКома». После нагрузки АД активная мощность начинает расходоваться и устанавливается на уровне $P = 4,2 \cdot 10^5$ Вт, а реактивная не меняется.

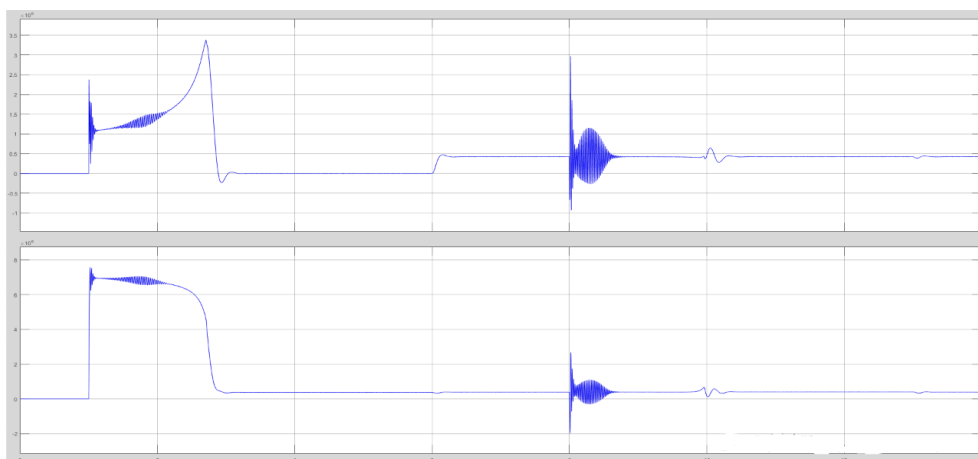


Рис. 24. График активной P и реактивной Q мощностей первого АД с использованием «СТАТКома»

После запуска второго АД на первом наблюдаются кратковременный скачок до $P = 29 \cdot 10^5$ Вт. Реактивная мощность достигла значения $Q = 2,7 \cdot 10^6$ ВАр. Следовательно, мощности в целом увеличились, но соотношение Q к P уменьшилось.

На рис. 25 показана активная, реактивная мощности второго АД.

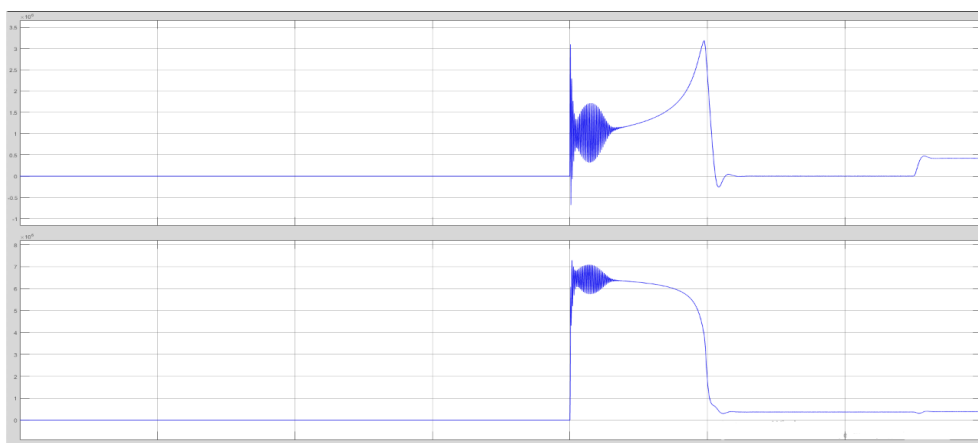


Рис. 25. График активной P и реактивной Q мощностей второго АД с использованием «СТАТКома»

На графике (см. рис. 25) наблюдается в момент пуска $P = 31 \cdot 10^5$ Вт, что на $3 \cdot 10^5$ больше прошлого значения. Реактивная мощность $Q = 7,3 \cdot 10^6$ ВАр, процесс кратковременный, равный 0,005 с. После окончания переходного процесса P возвращается к нулю, а $Q = 3,7 \cdot 10^5$ ВАр. После подачи на вал нагрузки активная мощность начинает расходоваться и устанавливается на уровне $P = 4,2 \cdot 10^5$ Вт, так же, как в схеме без «СТАТКома».

На рис. 26 представлены суммы токов, протекающих через источник, которые представляют собой сумму токов статора двух АД. Для удобства восприятия был произведен переход из двумерной системы координат в фазовую, которая наиболее близка по своей физической сущности к реальному АД.

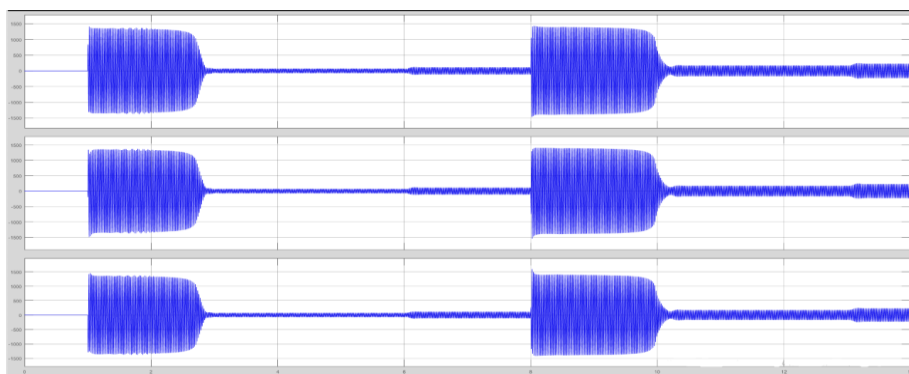


Рис. 26. График суммы токов статора АД в трехфазной системе координат

На рис. 27 представлены токи статора и «СТАТКома» в трехфазной системе координат в узле нагрузки.

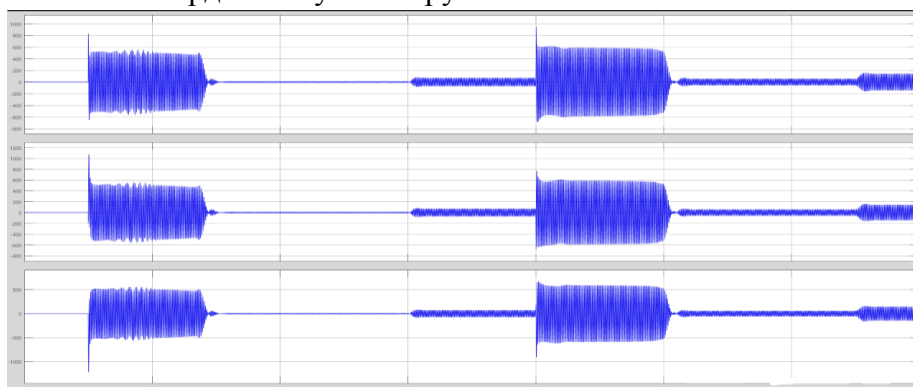


Рис. 27. Сумма токов статора и «СТАТКома» в трехфазной системе координат в узле нагрузки

На рис. 28 представлен график суммы реактивных мощностей, выделяющихся на двух АД.

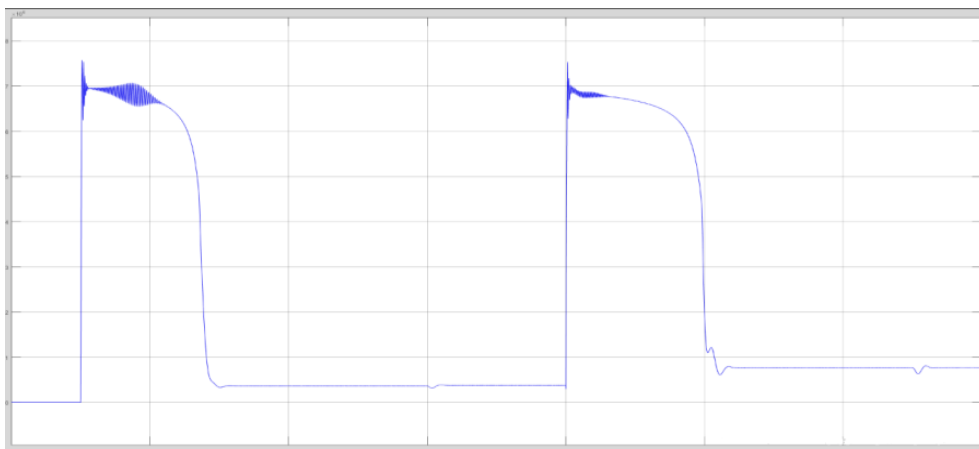


Рис. 28. График суммы реактивных мощностей Q двух АД

На рис. 29 представлен график реактивной мощности, выделяющейся на «СТАТКоме».

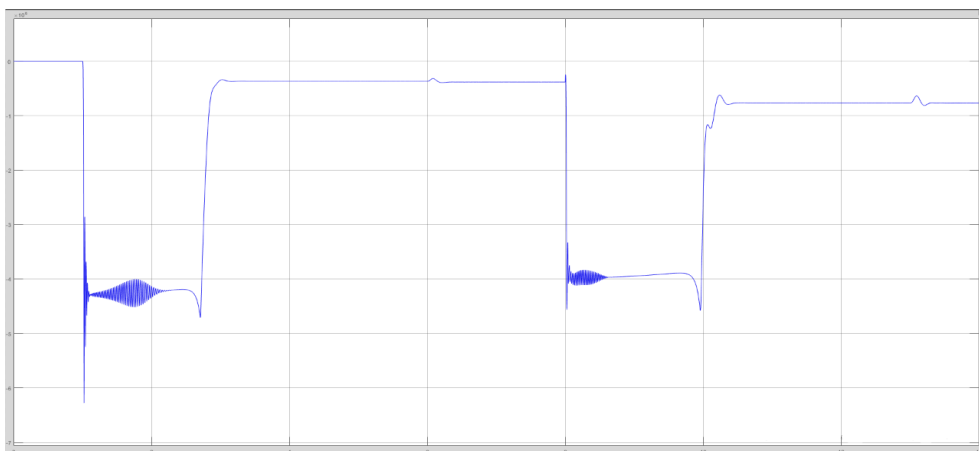


Рис. 29. График реактивной мощности Q «СТАТКома»

Из графиков на рис. 28 и 29 видно, что в узле подключения двух АД и «СТАТКома» происходит компенсация реактивной мощности Q . Часть реактивной мощности при запуске первого АД (величиной $Q = 7 \cdot 10^6$ Вар) компенсируется реактивной энергией «СТАТКома» (величиной $Q = -4,3 \cdot 10^6$ Вар). Компенсация реактивной энергии величиной $Q = 6,7 \cdot 10^6$ Вар, выделяющейся при запуске второго АД, компенсируется энергией на «СТАТКоме», величиной $Q = -4 \cdot 10^6$ Вар.

В таблице представлены средние значения уровней напряжения сети U , пускового тока $I_{\text{п}}$ и реактивной мощности Q .

Средние значения уровней напряжения сети U ,
пускового тока $I_{\text{п}}$ и реактивной мощности Q

Схема реализации	№ АД	T, C	$U, \text{В}$	$I_{\text{п}}$ в сети, А	$I_{\text{п}}$ двигателя, А	$Q, \text{Вар}$
Двигатель	I	4,25	3500 (70 %)	910 (203,6 %)	910 (203,6%)	$3 \cdot 10^6$
	II	4,7	3350 (67 %)	966 (222,8 %)	880 (196,9%)	$2,8 \cdot 10^6$
Двигатель со «СТАТКомом»	I	2,15	5200 (104 %)	500 (111,9 %)	1350 (302%)	$6,7 \cdot 10^6$
	II	2,4	5000 (100 %)	590 (132 %)	1300 (290,9%)	$6,3 \cdot 10^6$
СТАТКом	I	–	–	–	–	$-4,3 \cdot 10^6$
	II	–	–	–	–	$-4 \cdot 10^6$

При использовании устройства «СТАТКом» переходный процесс пуска двигателя протекает быстрее в 2 раза. Следовательно, электрическая сеть нагружается в меньшей степени, увеличивается срок эксплуатации, поэтому обеспечивается более щадящий режим для изоляции. Изменение напряжения в схеме со «СТАТКомом» наблюдалось в меньшей степени, следовательно, не будет наблюдаться большой посадки напряжения сети. Пусковые токи так же были близки к паспортным значениям. Нагрузка была в пределах допустимой нормы. Реактивная мощность двигателей со «СТАТКомом» увеличилась в 2 раза, это объясняется более быстрым протеканием переходного процесса. Большая часть этой энергии компенсировалась «СТАТКомом».

Следовательно, использование «СТАТКома» для компенсации реактивной мощности оправданно:

- снизилось время переходного процесса;
- колебания напряжений были близкими к номинальным значениям;
- пусковые токи двигателей уменьшились и практически не отличались от паспортных значений;
- удалось скомпенсировать большую часть реактивной мощности.

Заключение

Цель компенсации реактивной мощности в узле нагрузки с использованием устройства «СТАТКом» достигнута.

В результате исследований был произведен анализ существующих проблем тяжелого пуска АД, рассмотрены пути их решения; разработаны математические модели АД на примере 4АЗМП-5000/6000, источника электрической энергии, «СТАТКома»; исследованы их взаимодействия; выявлено влияние пусковых режимов АД.

В ходе исследований собрана модель электрической сети, включающей источник синусоидального напряжения с линией электропередач длиной 4,5 км, учитывающая величины активных и реактивных сопротивлений, два АД, компенсатор «СТАТКом».

Произведен анализ влияния пусковых токов на электрическую сеть и последовательный пуск двух АД с применением «СТАТКома». При использовании устройства «СТАТКом» переходный процесс протекал в 2 раза быстрее, электрическая сеть нагружалась в 2 раза меньше. Поэтому может быть увеличен срок эксплуатации электрооборудования и выбран более щадящий режим для изоляции.

При использовании «СТАТКома» напряжение сети незначительно отличалось от номинального, пусковые токи также оказались близки к номинальным.

Реактивная мощность двигателей со «СТАТКомом» увеличилась в 2 раза, это объясняется более быстрым протеканием переходного процесса. Большая часть этой энергии компенсировалась «СТАТКомом».

Включение «СТАТКома» в сеть позволило:

- снизить время переходного процесса пуска двигателя;
- уменьшить токи двигателя, а значит, и электросети;
- снизить посадку напряжения сети при пуске двигателей;
- скомпенсировать реактивную мощность.

Использование «СТАТКома» для компенсации реактивной мощности целесообразно при эксплуатации электрических двигателей переменного тока как цилиндрических, так и линейных. Уменьшение времени протекания переходного процесса в случае применения компенсатора реактивной мощности благотворно отразится на быстродействии линейного двигателя, который получил широкое применение в качестве исполнительных устройств в системах автоматического

регулирования и управления. Широкое применение линейных двигателей, например, цилиндрических линейных вентильных двигателей, совместно с синхронным статическим компенсатором реактивной мощности «СТАТКом» позволит снизить потребление электроэнергии в нефтедобывающей, металлообрабатывающей и машиностроительной отраслях, следовательно, повысит эффективность работы устройств в этих сферах деятельности человека [24–26].

Библиографический список

1. Байниязов Б.А., Мухамедин А.Н. К вопросу о повышении пропускной способности высоковольтных линий электропередачи в условиях Республики Казахстан // Молодой ученый. – 2020. – № 20 (310). – С. 87–90.
2. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
3. Иваницкий В.А., Тюленёв М.Е. Электротехника и электроника: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, – 2012. – 228 с.
4. Колосов С.В., Рыжков С.В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / ЗАО НТЦ «Электросети». – М., 2020. – 36 с.
5. Куро Ж. Современные технологии повышения качества энергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. – 2016. – № 1. – С. 31–35.
6. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практ. расчетов. – М.: ЭНАС, 2019. – 456 с.
7. Шулаков Н.В. Электрические Машины: конспект лекций. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 325 с.
8. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (спец. курс). – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
9. Магомедов А.М., Герейханов Р.К. Способ увеличения показателей качества электроэнергии на предприятиях и распределительных сетях // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2015 г.). – СПб.: Свое издательство, 2018. – С. 62–67.

10. Шидловский А.К., Федий В.С. Регулируемые источники реактивной мощности // *Электричество*. – 2009. – № 1. – С. 15–20.

11. Кузьмин С.В. Система управления статическим компенсатором реактивной мощности для симметрирования трёхфазной нагрузки // *Молодой ученый*. – 2018. – № 6 (65). – С. 175–179.

12. Кукарекин Е.А., Хацевский К.В. Устройство компенсации реактивной мощности типа D-СТАТКОМ для распределительных сетей 6–10 кВ // *Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. статей*. – Новосибирск: АНС СибАК, 2016. – С. 219–224.

13. Марикин А.Н., Кузьмин С.В., Виноградов С.А. Применение преобразования Парка – Горева для управления статическим компенсатором реактивной мощности тяговой сети переменного тока // *Вестник РГУПС*. – 2019. – № 2. – С. 47–54.

14. Бубенчиков А.А., Данилов Д.И., Шевченко Д.Ю. Обзор методов повышения пропускной способности линий электроэнергетических систем // *Молодой ученый*. – 2016. – № 28.2 (132.2). – С. 18–23.

15. Букреев С.В., Беклемишев А.М. Математические модели электротехнических комплексов буровых установок, учитывающие взаимное влияние системы электроснабжения и техническое состояние главных электроприводов исполнительных механизмов // *Молодой ученый*. – 2017. – № 20 (79). – С. 110–114.

16. Щеглов Н.В. Современные подходы к совершенствованию и развитию воздушных линий электропередачи // *Линии электропередачи 2010: проектирование строительство опыт эксплуатации и научно технический прогресс: материалы Четвертой Рос. науч.-прак. конф. с междунар. участ.* – Новосибирск, 2010. – С. 64–70.

17. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.

18. Козлов М. Д. Векторное управление активным выпрямителем напряжения // *Молодой ученый*. – 2016. – № 9 (113). – С. 184–189.

19. Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде MatLab. – СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2016. – 82 с.

20. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: Корона – ВЕК, 2018. – 368 с.

21. Герман-Галкин С.Г. Виртуальная лаборатория полупроводниковых систем в среде MatLab-Simulink: учебник. – СПб.: Лань, 2019. – 448 с.

22. Кочкин В.И., Нечаев, О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: НЦ «ЭНАС», 2017. – 248 с.

23. Нестеров А.С., Васильев П.Ф., Кобылин В.П. Анализ и расчет пропускной способности воздушных линий электропередачи // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 21–26.

24. Методика расчета цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами для электропривода шлифовального станка / А.Д. Коротаев, Н.В. Жужгов, Е.А. Чабанов, А.Т. Ключников, А.Л. Погудин, П.В. Кулешов // Электротехника. – 2021. – № 11. – С. 9–14.

25. Цилиндрический линейный вентильный двигатель для добычи нефти бесштанговым методом / К.А. Конев, А.О. Фурина, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 39. – С. 150–168. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.08

26. Чабанов Е.А., Коротаев А.Д. Конструкция и технология изготовления цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами для электропривода шлифовального станка // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 40. – С. 93–108. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.06

References

1. Bainiiazov B.A., Mukhamedin A.N. K voprosu o povyshenii propusknoi sposobnosti vysokovol'tnykh linii elektroperedachi v usloviakh Respubliki Kazakhstan [On the issue of increasing the capacity of high-voltage transmission lines in the conditions of the Republic of Kazakhstan]. *Molodoi uchenyi*, 2020, no. 20 (310), pp. 87-90.

2. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. 2nd ed. Leningrad: Energiia, 1974, 840 p.

3. Ivanitskii V.A., Tiulenev M.E. Elektrotehnika i elektronika [Electrical engineering and electronics]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, 228 p.

4. Kolosov S.V., Ryzhkov S.V. Povyshenie propusknoi sposobnosti

VL: analiz tekhnicheskikh reshenii [Increasing the transmission capacity of overhead lines: an analysis of technical solutions]. Moscow: ZAO NTTs "Elektroseti", 2020, 36 p.

5. Kuro Zh. Sovremennye tekhnologii povysheniia kachestva energii pri ee peredache i raspredelenii [Modern technologies for improving the quality of energy in its transmission and distribution]. *Novosti elektrotekhniki. Informatsionno-spravochnoe izdanie*, 2016, no. 1, pp. 31-35.

6. Zhelezko Iu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaia moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlia prakticheskikh raschetov [Loss of electricity. Reactive power. Power quality: a guide for practical calculations]. Moscow: ENAS, 2019, 456 p.

7. Shulakov N.V. Elektricheskie Mashiny [Electrical Machines]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 325 p.

8. Sipailov G.A., Kononenko E.V., Khor'kov K.A. Elektricheskie mashiny (spetsial'nyi kurs) [Electrical machines (special course)]. Moscow: Vysshaia shkola, 1987, 287 p.

9. Magomedov A.M., Gereikhanov R.K. Sposob uvelicheniia pokazatelei kachestva elektroenergii na predpriatiiakh i raspreditel'nykh setiakh [Method for increasing the quality of electricity at enterprises and distribution networks]. *Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Saint Petersburg, July 2015). Saint Petersburg: Svoe izdatel'stvo, 2018, pp. 62-67.

10. Shidlovskii A.K., Fedii V.S. Reguliruemye istochniki reaktivnoi moshchnosti [Regulated sources of reactive power]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 1, pp. 15-20.

11. Kuz'min S.V. Sistema upravleniia staticheskim kompensatorom reaktivnoi moshchnosti dlia simmetrirovaniia trekhfaznoi nagruzki [Control system for a static reactive power compensator for balancing a three-phase load]. *Molodoi uchenyi*, 2018, no. 6 (65), pp. 175-179.

12. Kukarekin E.A., Khatsevskii K.V. Ustroistvo kompensatsii reaktivnoi moshchnosti tipa D-STATCOM dlia raspreditel'nykh setei 6-10 kV [Reactive power compensation device type D-STATCOM for distribution networks 6-10 kV]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletii. Tekhnicheskie nauki. Sbornik statei*. Novosibirsk: ANS SibAK, 2016, pp. 219-224.

13. Marikin A.N., Kuz'min S.V., Vinogradov S.A. Primenenie preobrazovaniia Parka-Goreva dlia upravleniia staticheskim kompensatorom

reaktivnoi moshchnosti tiagovoi seti peremennogo toka [Application of the Park-Gorev transformation to control the static reactive power compensator of the AC traction network]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2019, no. 2, pp. 47-54.

14. Bubenchikov A.A., Danilov D.I., Shevchenko D.Iu. Obzor metodov povysheniia propusknoi sposobnosti linii elektroenergeticheskikh sistem [Overview of methods for increasing the capacity of lines of electric power systems]. *Molodoi uchenyi*, 2016, no. 28.2 (132.2), pp. 18-23.

15. Bukreev S.V., Beklemishev A.M. Matematicheskie modeli elektrotekhnicheskikh kompleksov burovykh ustanovok, uchityvaiushchie vzaimnoe vliianie sistemy elektrosnabzheniia i tekhnicheskoe sostoianie glavnykh elektroprivodov ispolnitel'nykh mekhanizmov [Mathematical models of electrical complexes of drilling rigs, taking into account the mutual influence of the power supply system and the technical condition of the main electric drives of the actuators]. *Molodoi uchenyi*, 2017, no. 20 (79), pp. 110-114.

16. Shcheglov N.V. Sovremennye podkhody k sovershenstvovaniuu i razvitiuu vozdushnykh linii elektroperedachi [Modern approaches to the improvement and development of overhead power lines]. *Linii elektroperedachi 2010: proektirovanie stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno tekhnicheskii progress. Materialy Chetvertoi Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Novosibirsk, 2010, pp. 64-70.

17. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshaia shkola, 1987, 248 p.

18. Kozlov M.D. Vektornoe upravlenie aktivnym vypriamitelem napriazheniia [Vector control of an active voltage rectifier]. *Molodoi uchenyi*, 2016, no. 9 (113), pp. 184-189.

19. Vasil'ev A.S., Lashmanov O.Iu. Osnovy programmirovaniia v srede MatLab [Fundamentals of programming in the MatLab environment]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2016, 82 p.

20. German-Galkin S.G. MatLab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on PC]. Saint Petersburg: Korona - VEK, 2018, 368 p.

21. German-Galkin S.G. Virtual'naia laboratoriia poluprovodnikovyykh sistem v srede MatLab-Simulink [Virtual Laboratory of Semiconductor Systems in MatLab-Simulink]. Saint Petersburg: Lan', 2019, 448 p.

22. Kochkin V.I., Nechaev, O.P. Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setiakh energosistem i predpriatii [Application of static reactive power compensators in electrical networks of power systems and enterprises]. Moscow: NTs ENAS, 2017, 248 p.

23. Nesterov A.S., Vasil'ev P.F., Kobylin V.P. Analiz i raschet propusknnoi sposobnosti vozdushnykh linii elektroperedachi [Analysis and calculation of the capacity of overhead power transmission lines]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 21-26.

24. Korotaev A.D., Zhuzhgov N.V., Chabanov E.A., Kliuchnikov A.T., Pogudin A.L., Kuleshov P.V. Metodika rascheta tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami dlia elektroprivoda shlifoval'nogo stanka [Calculation method of a cylindrical linear valve motor with permanent magnets for an electric drive of a grinding machine]. *Elektrotehnika*, 2021, no. 11, pp. 9-14.

25. Konev K.A., Furina A.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A. Tsilindricheskii lineinyi ventil'nyi dvigatel' dlia dobychi nefti besshtangovym metodom [Cylindrical linear valve engine for oil production by the rodless method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2021, no. 39, pp. 150-168. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.08

26. Chabanov E.A., Korotaev A.D. Konstruktsiia i tekhnologiia izgotovleniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami dlia elektroprivoda shlifoval'nogo stanka [Design and manufacturing technology of a cylindrical linear valve motor with permanent magnets for the electric drive of a grinding machine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2021, no. 40, pp. 93-108. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.06

Сведения об авторах

Мальцев Илья Анатольевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29); инженер Научно-исследовательского отдела ЗАО «Научно-исследовательское производ-

ственное объединение» (НИПО) (614081, Пермь, ул. Голева, 9а, e-mail: malcevia18.08.1997@mail.ru).

Тюленев Михаил Евгеньевич (Пермь, Россия) – начальник Научно-исследовательского отдела ЗАО «Научно-исследовательское производственное объединение» (НИПО) (614081, Пермь, ул. Голева, 9а, e-mail: tyulenyov@yandex.ru).

Чабанов Евгений Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

About the authors

Ива А. Malcev (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolskiy pr.); research engineer, CJSC “NIPO” (614081, Perm, 9a, Goleva str., e-mail: malcevia18.08.1997@mail.ru).

Michaile E. Tyulenyov (Perm, Russian Federation) – head of research department CJSC “NIPO” (614081, Perm, Goleva str., 9a, e-mail: tyulenyov@yandex.ru).

Evgenii A. Chabanov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Politechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolskiy pr., e-mail: ceapb@mail.ru).

Поступила 02.12.2021

Одобрена 10.02.2022

Принята к публикации 20.06.2022

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSNM-2020-0028.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.