

Научная статья
УДК 621.313.33
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-3-98-105>
EDN JTRMXP

В порядке обсуждения

Об электромагнитных и механических взаимодействиях в асинхронных машинах

Юрий Николаевич Казаков^{1✉}, Вячеслав Валерьевич Зимин²

¹*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, kagakovyn@mail.ru*

²*АО «Каспийский трубопроводный консорциум – Р»,
Астрахань, Россия*

Аннотация. Проводится детальный анализ электроэнергетических и электромеханических взаимодействий в асинхронных машинах с позиций фундаментальных законов электрофизики, аналитической механики и теоретической электротехники. Предлагается структурно-логическая схема (дорожная карта) движения электромагнитной энергии от источника питания двигателя до вращения вала и жестко связанного с ним приводного механизма. Каждый этап движения энергии сопровождается пояснением причин, вызывающих движение со ссылками на формирующие эти этапы законы и постулаты электрофизики и электромеханики. Показывается формирование фундаментального закона движения механической энергии в сопровождении потенциальной (внешней по отношению к двигателю), кинетической (внутренней механической) и энергии, связанной с тепловыми потерями вращающейся системы «двигатель – приводной механизм». Одновременно показываются физические основы формирования соответствующих вращающихся и тормозных моментов. Определены оплошности, допускаемые в некоторых учебниках при формировании математических моделей асинхронных двигателей. Исследуются физические основы формирования внешней (потенциальной) энергии и потребляемой двигателем мощности от внешнего источника. Подтверждено, что основной причиной вращения ротора двигателя является сила Ампера, формируемая соответствующим законом электродинамики. Приводятся аналитические зависимости, позволяющие вычислять и величину силы, и направление вращения вала двигателя. По величине силы, действующей на ротор, легко определяются соответствующие ей энергия и тормозной момент. Рассматриваются условия формирования номинальной скорости вращения ротора. Показан процесс формирования кинетической энергии вращающейся инерционной массы системы «двигатель – приводной механизм». Приводятся графики изменения всех видов энергии в рамках закона сохранения и превращения энергии, позволяющие наглядно анализировать процессы в машине. Сделаны выводы о существенном расширении возможностей при расчетах рабочих режимов машины.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, потенциальная энергия, кинетическая энергия, механическая энергия, вращающие моменты, режимы работы машин

Для цитирования: Казаков Ю. Н., Зимин В. В. Об электромагнитных и механических взаимодействиях в асинхронных машинах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 3. С. 98–105. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-3-98-105>. EDN JTRMXP.

Original article

On electromagnetic and mechanical interactions in asynchronous machines

Yuri N. Kagakov^{1✉}, Vyacheslav V. Zimin²

¹*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, kagakovyn@mail.ru*

²*Caspian Pipeline Consortium - R, JSC,
Astrakhan, Russia*

Abstract. A detailed analysis of electric power and electromechanical interactions in asynchronous machines is carried out from the standpoint of the fundamental laws of electrophysics, analytical mechanics and theoretical electrical engineering. A structural and logical scheme (roadmap) of the movement of electromagnetic energy from the engine power source to the rotation of the shaft and the drive mechanism rigidly connected to it is proposed. Each stage of the energy movement is accompanied by an explanation of the causes of the movement with references to the laws and postulates of electrophysics and electromechanics that form these stages. The formation of the fundamental law of motion of mechanical energy is shown, accompanied by potential (external to the engine), kinetic (internal mechanical) and energy associated with thermal losses of the rotating system “engine – drive mechanism”. At the same time, the physical foundations of the formation of the corresponding torque and braking moments are shown. The mistakes made in some textbooks in the formation of mathematical models of asynchronous motors are determined. The physical foundations of the formation of external (potential) energy and the power consumed by the engine from an external source are investigated. It is confirmed that the main reason for the rotation of the motor rotor is the Ampere force formed by the corresponding law of electrodynamics. Analytical dependences are given that allow calculating both the magnitude of the force and the direction of rotation of the engine shaft. According to the magnitude of the force acting on the rotor, the corresponding energy and braking torque are easily determined. The conditions for the formation of the nominal rotation speed of the rotor are considered. The process of forming the kinetic energy of the rotating inertial mass of the “motor – drive mechanism” system is shown. Graphs of changes in all types of energy within the framework of the law of conservation and transformation of energy are given, which allow us to visually analyze the processes in the machine. Conclusions are drawn about a significant expansion of capabilities in calculating the operating modes of the machine.

Keywords: asynchronous motor, potential energy, kinetic energy, mechanical energy, torque, machine operating modes

For citation: Kagakov Yu. N., Zimin V. V. On electromagnetic and mechanical interactions in asynchronous machines. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2024;3:98-105. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-3-98-105>. EDN JTRMXP.

Введение

Вопросы, связанные с пониманием природы и принципов взаимодействия электроэнергетических, электромагнитных и механических процессов в электрических машинах, играют исключительно важную роль при их эксплуатации. В то же время в существующих работах [1, 2] эти вопросы часто обсуждаются недостаточно полно. Например, в учебнике по электрическим машинам, изданном в 2008 г. в рамках серии «300 лучших учебников для высшей школы», с продолжением издания в 2010 г. в разделе «Принципы действия асинхронной машины» формирование вращающего момента – основной и важнейшей функции двигателя – поясняется следующим образом: «...если симметричная трехфазная обмотка якоря подключена к симметричной системе трехфазного напряжения, то система трехфазных токов, также симметричная, возбуждает в воздушном зазоре вращающееся магнитное поле... Если обмотка ротора является трехфазной, то в ней индуцируется трехфазный ток. Этот ток создает вращающийся поток ротора Φ_2 , направление и частота которого при $n = 0$ $n_2 = \frac{f_2}{P} = \frac{f_1}{P} = n_1$ такие же, как у статора. Поэтому потоки Φ_1 и Φ_2 вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя Φ_δ . В результате взаимодействия токов ротора с потоком Φ_δ возникает действующая на проводники ротора сила F и вращающий момент M » [1, с. 16, 17].

Такое пояснение формирования принципов

действия асинхронных двигателей исчерпывающим признать никак нельзя. Отсутствие обоснования причин появления приводящей ротор во вращение силы F , которая, по сути, формирует все электроэнергетические процессы двигателя при ее воздействии на приводной механизм, не дает возможности определить не только причину и направление действия этой силы, но величину и направление действия вращающего момента.

Желательно было бы пояснить механизм формирования магнитного потока Φ_δ наложением двух потоков Φ_1 и Φ_2 , частоты которых одинаковы при $n = 0$, оставляя без пояснения ситуацию при $n > 0$, когда частоты $f_1 \neq f_2$ оказываются разными, следовательно, разными становятся и скорости вращения магнитных потоков $\dot{\Phi}_1$ и $\dot{\Phi}_2$. Но по правилу Ленца об индуцируемых ЭДС и токах [3] в этом случае поток $\Phi_2(t)$ направлен навстречу потоку $\Phi_1(t)$. В связи с этим формирование потока $\Phi_\delta(t)$ нуждается в пояснениях.

Серьезные вопросы вызывает и противоречащее фундаментальным законам теоретической электротехники направление тока в ветви обмотки ротора в эквивалентной схеме замещения двигателя [1, с. 103]. К сожалению, возникает и ряд других вопросов, связанных с обоснованием функционирования асинхронных двигателей. Попытки дать ответы на все эти вопросы предпринимаются в настоящей работе.

Формирование механической энергии вращения системы «ротор – приводной механизм»

Структурно-логическая схема движения электромагнитной энергии $W_{эм}$, поступающей в обмотку статора от внешнего источника питания, к формированию механической энергии $W_{мех}$ на валу ротора и в итоге – вращающего момента $M_{вр}$, приводящего во вращение всю инерционную массу машины, представлена на рис. 1. Первая строка на предлагаемой схеме представляет движение электромагнитной энергии в обмотке статора с переносом

ее в обмотку ротора. Вторая и третья строки представляют движение механической энергии в машине.

Движение электромагнитной энергии в обмотке статора формируется хорошо известными законами электродинамики и теоретической электротехники: от \dot{U}_1 к \dot{I}_1 – законом Ома, от \dot{I}_1 к $\dot{\Phi}_1$ – законом полного тока, от $\dot{\Phi}_1$ к \dot{E}_2 и \dot{I}_2 – законом Фарадея об индуцируемых ЭДС и токах.

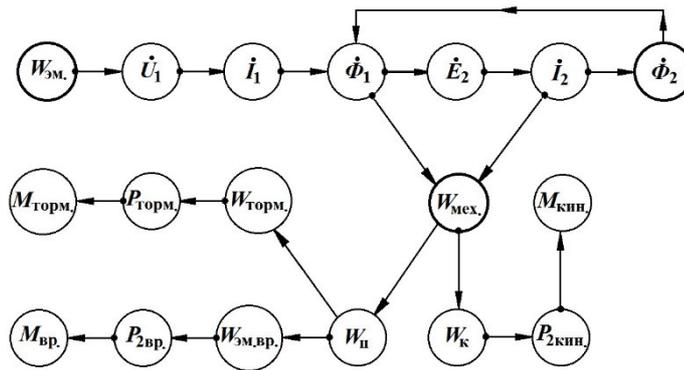


Рис. 1. Структурно-логическая схема движения электромагнитной энергии

Fig. 1. Structural and logical diagram of the movement of electromagnetic energy

Взаимодействие вращающегося магнитного потока $\dot{\Phi}_1$ в статоре с током \dot{I}_2 в обмотке ротора и приводит к появлению силы, формирующей механическую энергию $W_{мех}$ вращающегося ротора.

В соответствии с законом полного тока ток \dot{I}_2 формирует магнитный поток ротора $\dot{\Phi}_2$. При этом в соответствии с правилом Ленца [3, 5], сопровождающим закон Фарадея об индуцируемых ЭДС и токах, магнитный поток $\dot{\Phi}_2$ во всех случаях направлен навстречу потоку $\dot{\Phi}_1$, т. е. результирующий магнитный поток в асинхронной машине равен $\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2$. Это принципиально важно, поскольку поток $\dot{\Phi}_2$ в двигателе играет важную функцию регулирования величины потока $\dot{\Phi}_1$: уменьшение величины потока $\dot{\Phi}_1$ за счет действия потока $\dot{\Phi}_2$ автоматически приводит к уменьшению величины индуктивного сопротивления статорной обмотки, следовательно, к росту тока и потока $\dot{\Phi}_1$ до номинального. Встречное включение обмоток статора и ротора в их магнитной связи приводит к изменению знаков некоторых слагаемых в общепринятой математической модели двигателя и к приведению направления тока в ветви вторичной обмотки схемы замещения в полное соответствие

с фундаментальными законами теоретической электротехники [4]. В связи с тем, что ротор относительно статора вращается (скользит) со скоростью $n_{2S} = Sn_1$, формируемые их обмотками магнитные потоки, вращающиеся со скоростями $n_1 = 2\pi f_1$ и $n_2 = 2\pi f_2 = 2\pi f_1 S$, относительно друг друга остаются неподвижными. Таким образом, магнитный поток двигателя во всех режимах его работы остается практически неизменным.

Поступающая в электрически изолированную от статора обмотку ротора энергия $W_{эм1}$ формируется магнитным потоком статора, величина которого во всем диапазоне рабочих режимов ротора остается практически постоянной. Это значит, что воспринимаемая ротором электромагнитная энергия $W_{эм2} = W_{эм1}$, формирующая все электромеханические процессы в роторе, представляет собой предельную суммарную величину, в рамках которой в соответствии с законом сохранения и превращения энергии и происходит движение энергии. Мерой электромагнитной энергии во всех режимах работы ротора является электромагнитная мощность:

$$P_{эм2S} = \text{Re} \left[\dot{E}_{2S}^* I_{2S} \right].$$

В связи с тем, что $\dot{E}_{2S} = S\dot{E}_2$, а $I_{2S}^* = \frac{\dot{E}_{2S}}{Z_{2S}}$, максимальными электромагнитная энергия $W_{эм2S}$ и мощность $P_{эм2S}$ становятся в момент пуска двигателя ($n_2 = 0, S = 1,0$). По мере увеличения скорости энергия $W_{эм2S}$ и мощность $P_{эм2S}$ уменьшаются и при достижении ротором синхронной скорости $n_2 = n_1, S = 0$ становятся равными нулю.

С увеличением скорости вращения ротора скольжение $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС \dot{E}_2 в обмотке ротора, следовательно, к уменьшению тока \dot{I}_2 и потока $\dot{\Phi}_2$. При синхронной скорости $n_1 = n_2$ ток I_2 и поток $\dot{\Phi}_2$ равны нулю. Общий магнитный поток при этом формируется током \dot{I}_1 и равен $\dot{\Phi}_1$.

Скорость вращения общего магнитного потока $\dot{\Phi}_1$, таким образом, формируется частотой тока статора и равна $n_1 = 2nf_1 = \omega_1 = \text{const}$. Скорость вращения n_2 и частота магнитного потока $\dot{\Phi}_2$ ротора определяются величиной скольжения S , т. е. $n_2 = n_1(1 - S)$, а $f_2 = Sf_1$. Поскольку скольжение ротора в установившемся режиме работы мало $S = (0,02 \div 0,05)$, разность частот к искажению формы кривой общего потока практически не приводит.

Взаимодействие магнитного потока статора $\dot{\Phi}_1$ с током \dot{I}_2 в проводниках (стержнях) обмотки ротора в соответствии с законом Ампера приводит к возникновению вращающего момента машины с формированием механической энергии ротора $W_{мех}$, которая формирует все силовые механические процессы, связанные с вращением инерционной массы ротора и приводного механизма. В соответствии с постулатами аналитической механики [4] механическая энергия вращения инерционной массы при отсутствии внешних воздействий на систему равна сумме потенциальной $W_{п}$ и кинетической $W_{к}$ энергий:

$$W_{мех} = W_{п} + W_{к}. \quad (1)$$

Величина этой общей механической энергии в процессе разгона, устойчивой работы и остановки вращающейся массы остается неизменной. В рамках неизменной механической энергии в соответствии с законом сохранения и превращения энергии происходит преобразование потенциальной энергии в кинетическую и наоборот. Потенциальная энергия в составе общей механической представляет собой работу потенциальных (внешних по отношению к ротору) сил, приводящих инерционную массу ротора в движение. Кинетическая энергия вращающегося тела является мерой

его механического движения и измеряется работой, которую может вернуть это тело при торможении до полной остановки [3, 5].

Потенциальная энергия в асинхронных машинах

Потенциальная энергия в асинхронных двигателях формируется силовым воздействием на токи в витках обмотки ротора вращающегося магнитного поля статора. Это силовое взаимодействие реализуется фундаментальным для электромеханики законом Ампера, в соответствии с которым на каждый проводник длиной l с током \bar{I} в нем, находящимся под воздействием внешнего магнитного поля с индукцией \bar{B} , действует сила \bar{F} . Классическая формулировка этого закона представляется в виде [3, 5]:

$$d\bar{F} = \bar{I}[d\bar{l} \cdot \bar{B}], \quad (2)$$

где $d\bar{F}$ – элемент силы \bar{F} ; $d\bar{l}$ – элемент длины проводника, вектор которого в обмотке двигателя по направлению совпадает с вектором тока \bar{I} в нем; \bar{B} – магнитная индукция вращающегося поля статора.

Направление силы \bar{F} в соответствии с правилами векторного умножения определяется по известному правилу левой руки: если вектор \bar{B} «входит» в ладонь, а четыре вытянутых пальца направлены в сторону тока \bar{I} в проводнике, то большой палец укажет направление, действующей на проводник силы \bar{F} (рис. 2).

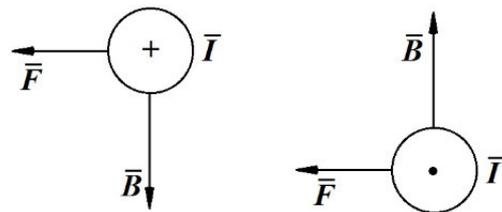


Рис. 2. Формирование силы, действующей на проводники с током со стороны магнитного поля

Fig. 2. Formation of the force acting on conductors with current from the magnetic field

Таким образом, изменение направления тока в пределах периода синусоиды автоматически изменяет направление магнитной индукции, оставляя направление действия силы \bar{F} неизменным. Силу \bar{F} называют силой Ампера. Эта сила и формирует основной вращающий момент в двигателе: $M_{вр} = FR$, где R – радиус цилиндра ротора, в пазах которого располагаются стержни роторной обмотки, длина

которых совпадает с длиной образующей цилиндра ротора с током I_2 в них. Энергия (мощность) силы F , создающей механический вращающий момент $M_{вр}$, при достижении телом угловой скорости ω , рад/с, равна $W_{вр} = W_{п} = M_{вр}\omega$.

Сила F по отношению к массе системы «ротор – приводной механизм» является внешней, следовательно, формирует внешнюю (потенциальную) энергию $W_{вр} = W_{пот}$ вращения ротора и входит в состав общей механической энергии вращающегося тела $W_{мех}$. Поскольку изменение в течение периода тока его направления на противоположное автоматически приводит к соответствующему изменению направления формируемой им магнитной индукции, направление действия силы Ампера в течение всего времени работы машины остается неизменным.

В связи с тем, что векторы \vec{F} , \vec{B} , \vec{I} в асинхронных машинах взаимно перпендикулярны, правило векторного умножения трех векторов форму-

лировку выражения (2) приводит к простому:

$$|\vec{F}| = F = I \cdot B \cdot l,$$

где I – ток в проводнике (стержне) роторной обмотки; B – индукция вращающегося поля статора; l – длина витка (стержня) обмотки.

Сила Ампера, формируемая токами всех трех фаз при взаимодействии с общим вращающимся магнитным потоком, в рамках общей механической энергии $W_{мех}$ инициирует общую потенциальную (внешнюю для ротора) энергию $W'_п$. В момент пуска двигателя при $n_2 = 0$ потенциальная энергия имеет максимальную величину $W'_{п\max} = W_{мех}$, поскольку кинетическая энергия неподвижного ротора $W'_к(0) = 0$. Эта энергия формирует в двигателе максимальный пусковой вращающий момент $M_{пуск}(0) = M_{вр\max}$. Начало вращения ротора двигателя на графиках (рис. 3) фиксируется точкой A .

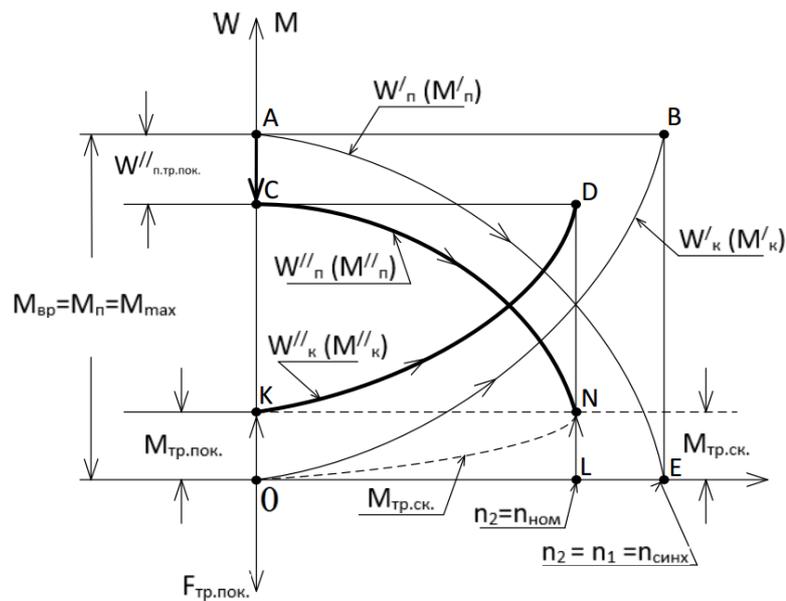


Рис. 3. Процессы формирования режимов работы двигателя

Fig. 3. The processes of forming engine operating modes

С началом вращения и набором скорости происходит непрерывный процесс преобразования потенциальной энергии в кинетическую, накапливаемую в инерционной массе системы «ротор – приводной механизм». При отсутствии трения при достижении ротором неизменной синхронной ($n_2 = n_1$) скорости вращения потенциальная энергия $W_{п}$ становится равной нулю (точка E на рис. 3).

Вся внешняя потенциальная энергия в этом случае «израсходована» на формирование кинетической энергии $W'_к$ вращающейся инерционной массы ротора. Вращение ротора в этом режиме теоретически может происходить бесконечно долго без потребления энергии источника питания за счет накопленной инерционной массой ротора кинетической энергии вращения (точка B на рис. 3)

в полном соответствии с (1) при $W_k = W_{\text{мех}} = \max$.

При наличии трения возрастание скорости вращения вала ротора происходит до тех пор, пока потенциальный вращающий момент внешних сил по величине превосходит момент трения скольжения. При их равенстве (точка N на рис. 3) рост скорости прекращается и наступает устойчивый режим работы. Этот режим принято называть номинальным ($n_{2S} = n_n$). Кинетическая энергия достигает при этом максимального значения, далее остается неизменной и при отключении питания некоторое время вращает вал ротора.

Силы трения при вращении инерционной массы

В реальных условиях в связи с наличием трения в опорах ротора возникает препятствующая вращению вала сила трения [3, 5]:

$$F_{\text{тр}} = k \frac{N}{R},$$

где k – коэффициент трения, зависящий от состояния трущихся поверхностей; N – сила нормального давления инерционной массы на неподвижную поверхность; R – радиус вала в опорах. Таким образом, сила трения остается неизменной при всех скоростях вращения вала.

В момент, предшествующий началу вращения ($n_2 = 0$), сила F , называемая силой трения покоя $F_{\text{тр.пок}}$, формирует препятствующий вращению вала момент трения покоя $M_{\text{тр.пок}}$. С начала движения ротора момент трения покоя преобразуется в равный ему момент трения скольжения $M_{\text{тр.ск}}(n_2) = FR = kN$, при установившейся скорости вращения достигающий максимальной величины, равной моменту трения покоя (см. рис. 3). При этом следует понимать, что сила нормального давления N формируется не только величиной давления массы, но всеми силами, препятствующими вращению вала. Например, трением лопастей воздушного вентилятора о воздух или движителем, т. е. винтом корабля в воде.

Наличие трения в опорах вала вносит существенные изменения в состав и виды электроэнергетических взаимодействий, формирующих вращение ротора машины. Теперь внешняя (потенциальная) энергия расходуется не только на формирование кинетической энергии вращения вала, но и на преодоление всех видов трения в опорах [3, 5]:

$$W_{\text{мех}} = W_n'' + W_k'' + W_{\text{тр.ск}}. \quad (3)$$

Это значит, что в установившемся режиме потенциальная энергия становится равной $W_n'' = W_{\text{мех}} - W_k'' - W_{\text{тр.ск}}$. Понятно, что в состав тепловых потерь следует включать нагрев проводни-

ков обмотки токами в них и корпуса двигателя гистерезисом и вихревыми токами.

График изменения потенциальной энергии и соответствующего ей вращающего момента при наличии трения в опорах представлен на рис. 3 (траектория изменения – по точкам $A \rightarrow C \rightarrow N$). В установившемся режиме в этом случае внешняя (потенциальная) энергия расходуется только на преодоление трения скольжения.

Изменение величины механической нагрузки, формируемой тормозным моментом скольжения, приводит к отклонению рабочего режима двигателя от номинального, т. е. к перемещению рабочей точки N по кривой $M_n''(n_2)$ в сторону увеличения (при $n_2 < n_n$) или уменьшения (при $n_2 > n_n$) величины вращающего момента с соответствующими изменениями тока в роторе и, как следствие, в статоре.

Кинетическая энергия в асинхронных машинах

В рамках общей неизменной механической энергии $W_{\text{мех}}$ в процессе вращения инерционной массы машины от момента пуска двигателя до достижения ротором установившейся скорости происходит непрерывный процесс преобразования внешней потенциальной энергии, передаваемой вращающимся полем статора в ротор, в кинетическую энергию вращения этой массы.

В соответствии с постулатами аналитической механики [3, 5] величина кинетической энергии вращающегося тела равна:

$$W_k = \frac{1}{2} M_{\text{ин}} \omega^2,$$

где $M_{\text{ин}}$ – момент инерции вращающейся массы; $\omega = 2\pi n_2$ – угловая скорость вращения. При массе вращающегося тела m величина инерционного момента равна $M_{\text{ин}} = \frac{1}{2} mR^2$, где R – радиус вращения центра инерционной массы относительно оси вращения ротора.

При отсутствии сил, препятствующих вращению, установившийся режим работы двигателя наступает при максимально возможной синхронной скорости, равной скорости вращения магнитного поля статора $n_2 = n_1 = 2\pi f_1$. Кинетическая энергия вращающейся массы становится максимальной (точка B на рис. 3), $W_k'(n_1) = W_{\text{мех}}$. Кинетический момент при этом $M_k'(n_1) = 2 \frac{W_k'(n_1)}{\omega_1^2}$. Потенциальная энергия в этом режиме в соответствии с (1) равна нулю. Соответственно, в момент пуска $W_n'(0) = W_{\text{мех}}$, а $W_k'(0) = 0$.

При наличии трения вращение вала ротора начинается не в момент $t_{\text{пуск}} = 0$ времени подключения двигателя к источнику питания, а спустя некоторое время Δt , которое требуется для набора инерционной массой ротора энергии, превышающей тормозной момент трения покоя $M_{\text{тр.пок}}$ (точка K на рис. 3). Таким образом, начало вращения ротора при $(n_2 = 0_+)$ происходит не одновременно с подключением двигателя к сети при $t_2 = 0_+$, т. е. мгновенного скачка тока здесь не происходит. Энергия, требуемая для преодоления момента $M_{\text{тр.пок}}$ восполняется расходом потенциальной энергии на участке AC . Дальнейший рост кинетической энергии происходит за счет потенциальной в соответствии с (3):

$$W_k'' = W_{\text{мех}} - W_{\text{тр}} - W_{\text{пот}}''.$$

Установившийся режим наступает при номинальной скорости вращения $n_{2н}$, при которой $M_n''(n_{2н}) = M_{\text{тр.ск}}$. Кинетическая энергия $W_k''(n_{2н})$ и соответствующий ей момент $M_k''(n_{2н})$ в своих масштабах на рис. 3 представляется отрезком ND .

Таким образом, выбор двигателя для выполнения им тех или иных рабочих функций производится по величине энергии (мощности) трения, формируемого приводимой во вращение общей инерционной массы системы «ротор – приводимый механизм», и кинетической энергии (мощности) вращения этой массы при выбранной номинальной скорости вращения ротора $n_{2н}$. При этом энергия, потребляемая выбранным двигателем от внешнего

источника (потенциальная энергия), равна:

$$W_n(n_n) = W_k(n_n) + W_{\text{тр.ск}}(n_n).$$

Баланс моментов во всем диапазоне работы двигателя (при любой величине n_2) приобретает вид:

$$M_n(n_2) = M_{\text{мех}} - M_{\text{тр.ск}}(n_2) - M_k(n_2).$$

Общая картина движения энергии, формируемого электроэнергетическими и электромеханическими взаимодействиями в асинхронных машинах, представлена на рис. 3. После отключения двигателя от источника питания вращение ротора некоторое время будет продолжаться за счет накопленной в этом режиме кинетической энергии до полной остановки ротора $n_2 = 0$.

Заключение

В предлагаемой статье приводится детальный анализ электроэнергетических процессов, сопровождающих движение электромагнитной энергии от источника питания двигателя к приводному механизму на валу ротора с трансформацией одного вида энергии в другую.

Полное понимание причинно-следственных связей с опорой на знание фундаментальных законов и постулатов электрофизики, аналитической механики и теоретической электротехники существенно расширяет возможности освоения не только теории, но и практики эксплуатации электрических машин во всем диапазоне режимов их работы.

Список источников

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. М.; СПб. и др.: Питер, 2010. 349 с.
2. Копылов И. П. Электрические машины. М.: Юрайт, 2019. 267 с.
3. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. М.: ОНИКС: Мир и образование, 2006. 497 с.
4. Демирчан К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
5. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Высш. шк., 2002. 718 с.

References

1. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow; Saint Petersburg i dr., Piter Publ., 2010. 349 p.
2. Kopylov I. P. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Iurait Publ., 2019. 267 p.
3. Iavorskii B. M., Detlaf A. A., Lebedev A. K. *Spravochnik po fizike dlia inzhenerov i studentov vuzov* [Handbook of Physics for engineers and university students]. Moscow, ONIKS: Mir i obrazovanie Publ., 2006. 497 p.
4. Demirchan K. S., Neiman L. R., Korovkin N. V. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p.
5. Detlaf A. A., Iavorskii B. M. *Kurs fiziki* [Physics course]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 2002. 718 p.

Статья поступила в редакцию 21.02.2024; одобрена после рецензирования 16.07.2024; принята к публикации 01.08.2024
The article was submitted 21.02.2024; approved after reviewing 16.07.2024; accepted for publication 01.08.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Николаевич Казаков — кандидат технических наук, профессор; Заслуженный работник высшей школы РФ; профессор кафедры электрооборудования и автоматизации судов; Астраханский государственный технический университет; kagakovyn@mail.ru

Вячеслав Валерьевич Зимин — инженер-электромеханик по автоматизированной информационно-измерительной системе коммерческого учета электрической энергии; АО «Каспийский трубопроводной консорциум – Р»; wzimin2010@mail.ru

Yuri N. Kagakov — Candidate of Technical Sciences, Professor; Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation; Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships; Astrakhan State Technical University; kagakovyn@mail.ru

Vyacheslav V. Zimin — Electromechanical Engineer for Automated Information-Measuring System for Commercial Accounting of Electrical Energy; Caspian Pipeline Consortium - R, JSC; wzimin2010@mail.ru

