

ПУТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЯЕМОГО ЗАПУСКА

Постановка задачи. Особую значимость пусковым процессам придает, с одной стороны, тот факт, что, с одной стороны, работа практически всех производственных процесса начинается с запуска именно электрического двигателя, а с другой стороны – широким спектром воздействий пускового процесса на работе электро-механической системы (ЭМС) и окружающий ее техноценоз.

Процесс запуска ЭМС является одним из наиболее энергетически напряженных режимов работы ЭМС, что связано с необходимостью сообщения кинетической энергии движущимся частям ЭМС. Значительные пусковые токи обуславливают особый режим нагрева электродвигателя, а значительные знакопеременные составляющие электромагнитного момента вызывают значительные вибрации и удары в механической передаче ЭМС, что обуславливает ускоренный износ электро-механического и технологического оборудования в процессе запуска. Пусковые провалы напряжения приводят к появлению целого ряда экономических рисков, связанных с недовыпуском готовой продукции вследствие снижения производительности или вынужденного простоя оборудования. Таким образом, влияние пусковых процессов, особенно электроприводов большой мощности, на экономические показатели предприятия является недооцененным и мало изученным.

Поэтому развитие теории оптимальных ЭМС управляемого запуска будет способствовать повышению технико-экономических показателей ЭМС, что и определяют высокую актуальность работы.

Материалы исследования. Анализ процессов запуска электро-механической системы основывается на классических положениях и законах классической механики – законе Ньютона, законе сохранения момента импульса, [1].

Рассмотрим уравнение динамики вращательного движения в форме закона сохранения импульса для вращательного движения, которое задается выражением

$$\frac{d(J_{\Sigma} \cdot \omega)}{dt} = (T_e - T_l) \quad (1)$$

где J_{Σ} – суммарный приведенный к валу электропривода момент инерции ЭМС, T_e , T_l – электромагнитный момент электродвигателя и статический момент сопротивления рабочей машины соответственно.

Выполняя дифференцирование этого уравнения, получим следующее:

$$J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} = (T_e - T_l) - \omega \cdot \frac{J_{\Sigma}}{dt} \quad (2)$$

Рассмотрим взаимовлияние ЭМС и её техноценоза.

Основными факторами, влияющими на развиваемый электроприводом вращающий момент, является состояние электроснабжающих сетей и техническое состояние самого электродвигателя.

Неидеальность сетей электроснабжения, а именно – отклонение фактических параметров питающего напряжения от номинальных значений, наличие несимметрии фазных напряжений, сложный гармонический состав сетевого напряжения – все это в разной степени снижает развиваемый электродвигателем вращающий момент. Неидеальность двигателя, которая возникает в ходе эксплуатации либо после некачественного ремонта, и проявляется в виде несимметрии электрических параметров обмоток статора и ротора, в несимметрии магнитной системы, также приводит к появлению токов обратных последовательностей, ухудшает пусковые свойства электродвигателей.

Существенное влияние на процесс запуска ЭМС оказывает рабочая машина ЭМС, определяющая параметры и характер изменения момента сопротивления электропривода T_l и суммарного приведенного момента инерции J_{Σ} . Механические характеристики реальных механизмов лишь приближенно описываются известной формулой Бланка в основном из-за того, что в момент трогания силы и моменты сопротивления покоя могут превышать их значения при установившемся движении [2]. Существование проблемы трогания констатируется в работах [3, 4], а обобщающие результаты исследований и классификация механизмов с особыми условиями запуска приведены в [5].

Рассмотрим основные направления обратного воздействия процесса запуска ЭМС на окружающий техноценоз.

Процесс запуска ЭМС является одним из наиболее энергетически напряженных режимов работы ЭМС, что связано с необходимостью сообщения кинетической энергии движущимся частям ЭМС. Работа в пусковом режиме, близком к режиму короткого замыкания, сопровождается 5–7 – кратными пусковыми токами, значительными потерями в обмотках электрической машины, и, соответственно, значительным энергопотреблением электрической машины.

Анализ многочисленных исследований надежности электрических машин, [6, 7], показывает существенное влияние пусковых процессов ЭМС на износ электромеханического и технологического оборудования и его остаточный технический ресурс.

Пусковые провалы напряжения приводят к появлению целого ряда экономических рисков. Эти риски связаны со следующими основными факторами:

- вследствие снижения напряжения на период запуска возникает риск недовыпуска готовой продукции, связанный со снижением производительности технологических механизмов, электроприводы которых подключены к общему узлу электроснабжения. В сложных случаях может происходить отключение этих электроприводов с полной остановкой технологических механизмов;

- вследствие неудавшегося запуска возникает риск недовыпуска готовой продукции, связанный с вынужденным простоем технологического оборудования на период времени, необходимый для подготовки и проведения повторного запуска. Для крупных СД этот период времени регламентируется правилами эксплуатации и может достигать двух часов.

Следует учитывать вероятностный характер этих дополнительных рисков. Вероятность их возникновения и вероятная величина экономического ущерба зависят от множества внешних факторов, находящихся вне зоны влияния и контроля запускаемой ЭМС.

Снижение влияния пусковых процессов ЭМС на техноценоз достигается применением специальных пусковых устройств. Очевидно, что различные траектории запуска ЭМС будут иметь не только различное время запуска, но также и различные затраты на осуществление процесса запуска. Таким образом, задачу оптимизации процесса запуска ЭМС можно отнести к классу задач энергоресурсосбережения, когда необходимо установить некоторый разумный компромисс между затратами на осуществление процесса запуска, которые состоят из затрат электроэнергии, износа электромеханического оборудования и риском дополнительного экономического ущерба. При создании оптимальных ЭМС управляемого запуска необходимо учитывать и величину положительного эффекта, создаваемого ЭМС управляемого запуска. В современной научно-технической литературе принципиально не освещен вопрос о том, в чем же состоит «полезность» процесса запуска, каким образом положительный эффект процесса запуска влияет на показатель качества траектории запуска.

В современной теории пусковых разработаны физико-математические модели электродвигателя и рабочей машины, позволяющие анализировать режимы их работы, выполнены исследования влияния пусковых режимов на надежность и технический ресурс элементов ЭМС, развита схематехника построения преобразовательных устройств, которые могут реализовывать самые сложные законы управления питающим напряжением, синтезированы алгоритмы управляемого запуска для механизмов со сложными условиями запуска.

Научная проблема состоит в том, что современная теория пусковых ЭМС, ограниченная рамками технической модели, не содержит методов построения оптимальных ЭМС, обеспечивающих согласованное с экономической целью производственной системы управление процессом запуска.

ЭМС является одной из многих подсистем предприятия и, естественно, её работа должна быть подчинена достижению системной цели предприятия. А эта цель, к огромному сожалению, лежит не в технической, а в чисто экономической плоскости.

Как и всякая производственная система, ЭМС для выполнения своих функций использует входные продукты и энергию, а по завершении успешного запуска создает полезный выходной продукт, а значит создает и добавленную стоимость. Этот процесс существует объективно, но не затронут в современной теории пусковых ЭМС.

Сформулируем цель функционирования ЭМС как обеспечение максимально возможной величины создаваемой в процессе запуска добавленной стоимости.

Развитые в рамках современной теории пусковых ЭМС модели оперируют с сигналами технического уровня и не содержат блоков и модулей, необходимых для определения величины входных и выходных продуктов. Например, для определения сигналов электрической мощности нам нужны вычислительные блоки, использующие сигналы тока и напряжения. Аналогичные элементы понадобятся нам и для вычисления прочих сигналов продуктового уровня модели ЭМС.

Что же именно является входными и выходными продуктами ЭМС?

В общем случае в процессе запуска может выполняться основной технологический процесс, например, осуществляться некоторое перемещение груза. Поэтому на входе и выходе ЭМС присутствуют вектор входных и выходных продуктов технологического процесса, выполняемого ЭМС.

Одним из важнейших входных продуктов процесса запуска является величина технического ресурса оборудования, использованного в процессе запуска.

Для реализации запуска ЭМС использует электрическую энергию.

Существенным отличием ЭМС является то, что она создает уникальный, присущий только этой системе выходной продукт, который проявляется в виде кинетической энергии движущихся частей ЭМС. Очевидно, что механизм, находящийся в состоянии равномерного движения обладает более высокой ценностью, чем тот же механизм, находящийся в состоянии покоя.

Формирование сигналов продуктового уровня - потребляемой электроэнергии, износа оборудования и выходного продукта ЭМС осуществляется функциональными преобразователями на основе технических сигналов ЭМС.

Внутренняя структура таких функциональных преобразователей рассматривалась в работах автора [8, 9].

Столь сложный, разнородный состав входных и выходных продуктов процесса запуска обуславливает сложность их применения для задачи оценки качества процесса запуска. Так как входные и выходные продукты ЭМС рассматриваются в их количественном выражении, то их значения нельзя объединять между собой из-за проблемы размерности.

Для преодоления проблемы размерности необходимо применить полное агрегирование входных и выходных продуктов в один класс с применением сопоставимых единиц измерения. Для технических систем в качестве таких единиц измерения целесообразно использовать стоимостные оценки, как экономически обоснованную разновидность метода экспертных оценок. Такой подход дополнительно существенно снижает субъективность при определении числовых значений весовых коэффициентов.

При использовании этого подхода векторы продуктов ЭМС преобразуются в сигналы стоимостных оценок и агрегируются в одномерные сигналы суммарной стоимостной оценки продуктов, которые после интегрирования за время запуска образуют скалярные характеристики процесса запуска - интегральные стоимостные оценки входных и выходных продуктов процесса запуска.

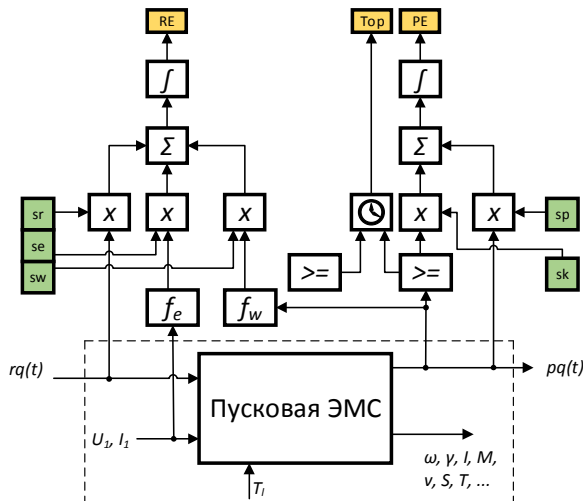


Рисунок 1 - Структурная схема подсистемы определения кибернетических показателей процесса запуска ЭМС

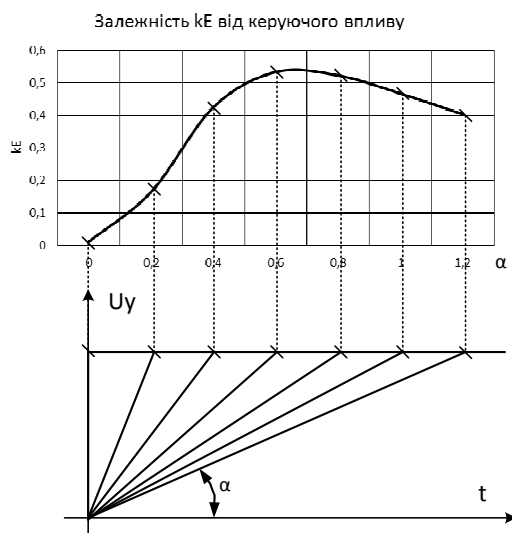


Рисунок 2 – Зависимость показателя эффективности процесса запуска от длительности линейной развертки управляющего напряжения

Предложенный подход позволяет последовательно перейти от анализа мгновенных значений технических сигналов через стоимостные оценки продуктов запуска к анализу процесса запуска, основанном на трех скалярных показателях: RE – интегральная величина стоимости входных продуктов ЭМС (экономические затраты); PE – интегральная величина стоимости выходных продуктов ЭМС (экономический доход); Top – длительность процесса запуска.

В силу универсальности этих показателей, присущих любой пусковой ЭМС, независимо от ее конструкции, первые две характеристики процесса запуска следует отнести к кибернетическому уровню сигналов модели ЭМС. На рис.1 представлена структурная схема подсистемы определения кибернетических показателей процесса запуска ЭМС, реализующая изложенную выше методологию.

На основании анализа научной литературы, [10, 7, 11], в качестве критерия качества процесса запуска был обоснован критерий эффективности процесса запуска, использующий в своей структуре все кибернетические характеристики процесса запуска:

$$E = \frac{(PE - RE - FE)^2}{PE \cdot RE \cdot T_{op}^2} \quad (3)$$

где PE, RE – интегральная величина стоимости выходных и входных продуктов процесса запуска ЭМС; Top – длительность процесса запуска; FE – интегральная величина дополнительных рисков процесса запуска.

Для изучения поведения показателя эффективности процесса запуска было использовано математическое моделирование. По приведенной выше структурной схеме была реализована подсистема определения показателя эффективности процесса запуска, которая подключалась к моделям электроприводов постоянного и переменного тока. В качестве параметра управления рассматривалось изменение времени линейной развертки управляющего напряжения преобразователя. Предложенная структура подсистемы определения показателя эффективности процесса запуска является инвариантной относительно типа электропривода и конструкции преобразовательного устройства. Результаты исследований показателя эффективности процесса запуска представлены на рис.2.

Зависимость показателя эффективности процесса запуска от времени развертки имеет явно выраженный экстремальный характер для всех рассмотренных типов электроприводов.

Выводы. Современная теория пусковых ЭМС была обогащена схмотехническим решением универсальной надстройки для определения кибернетических показателей пускового процесса – интегральных стоимостных оценок входных и выходных продуктов. Впервые введен показатель эффективности процесса запуска и обоснована возможность его применения для выбора оптимальной траектории запуска ЭМС. Подтверждена независимость синтезированной структуры определения показателя эффективности процесса запуска от конструкции ЭМС. Установлен экстремальный характер критерия эффективности процесса запуска от управляющих воздействий, что позволяет однозначным образом установить оптимальную траекторию запуска из множества доступных. Максимизация вклада ЭМС управляемого запуска в целевой продукт производственной системы достигается расширением структуры пусковой ЭМС, обеспечивающей измерение количественных оценок входных и выходных продуктов процесса запуска, определение интегральной величины стоимостных оценок входных и выходных продуктов процесса запуска, определение времени процесса запуска и формирование управляющего сигнала, рассчитанного по критерию эффективности процесса запуска.

Список литературы: 1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. Теоретическая физика. — М.: Наука, 1988. — Т. 1 : 214 с. 2. Гладырь А.И. Трогание и пуск как фазы единого процесса // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов Кременчугского государственного политехнического университета. — Кременчуг: КГПУ. — 2001. — 1(10). — С. 24-29. 3. Клепиков В.Б., Кутовой Ю.Н. К природе автоколебательных режимов в электроприводах шаровых мельниц // Науковий вісник Дніпропетровського національного гірничого університету. — 2004. — Вип. 3. — С. 29-30. 4. Фираго Б.И., Павлячек Л.Б. Теория Электропривода. — Мн: ЗАО "Техноперспектива", 2004. — 527 с. 5. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов. — Кременчуг : Ч.П. Щербатых А.В., 2006. 6. Ванеев Б.Н., Главный В.Д., Гостищев В.М., Сердюк Л.И. Надежность асинхронных электродвигателей: Под ред Б.Н. Ванеева / Под ред. Б.Н. Ванеева. — К.:Техніка, 1983. — 143 с. 7. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем. — Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. — 246 с. 8. Титюк В.К., Харченко В.В. Разработка инструментальных средств для измерения мощности в математических моделях // Вісник Криворізького технічного університету. — 2012. — Вип. 31.. — С. 211-215. 9. Титюк В.К., Михайленко А.Ю. Математична модель визначення вартісної оцінки експлуатаційного зносу обладнання // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. — 2010. — Вип.3(11). — С. 139-141. 10. Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ, Кременчуг. — 2002. — Вып.1. — С. 81-85. 11. Луценко И.А. Основы теории эффективности. — Канада : Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., 2012. — 65 с.

Bibliography (transliterated): 1. Landau L. D., Lifshits E. M. Mehanika. Teoreticheskaya fizika.. — M.: Nauka, 1988. — T. 1 : 214 c. 2. Gladvir A.I. Troganie i pusk kak fazyi edinogo protsesssa // Problemyi sozdaniya novyih mashin i tehnologiy. Sb. nauchnyih trudov Kremenchugskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. — Kremenchug: KGPU. — 2001. — 1(10). — C. 24-29. 3. Klepikov V.B., Kutovoy Yu.N. K prirode avtokolebatelnyih rezhimov v elektroprivodah sharovviih melnits // Naukoviy vlsnik DnI-propetrovskogo natsionalnogo gIrnichogo unIversitetu. — 2004. — Vip. 3. — C. 29-30. 4. Firaqo B.I., Pavlyachek L.B. Teoriya Elektroprivoda. — Mn: ZAO "Tehnoperspektiva", 2004. — 527 c. 5. Chernviv A.P., Gladvir A.I., Osadchuk Yu.G., Kurbanov I.R., Voshun A.N. Puskovyye sistemyi nereguliruemyih elektroprivodov. — Kremenchug : Ch.P. Scherbatyih A.V., 2006. 6. Vaneev B.N., Glavnyiy V.D., Gostishev V.M., Serdyuk L.I. Nadezhnost asinhronnyih elektrodvigatoley: Pod red B.N. Vaneeva / Pod red. B.N. Vaneeva. — K.:Tehnika, 1983. — 143 c. 7. Chernviv A.P., Rodkin D.I., Kalinov A.P., Vorobeychik O.S. Monitoring parametrov elektricheskiih dvigateley elektromehanicheskiih sistem. — Kremenchug: ChP Scherbatyih A.V., 2008. — 246 c. 8. Tyityuk V.K., Harchenko V.V. Razrabotka instrumentalnyih sredstv dlya izmereniya moschnosti v matematicheskiih modelvah // VIsnik KrivorIz-kogo tehnIchnogo unIversitetu. — 2012. — Vip. 31.. — C. 211-215. 9. Tityuk V.K., Mihaylenko A.Yu. Matematichna model viznachennva vartIsnoYi otsInki ekspluatatsIynogo znosu obladnannva // VIsnik Kremenchutskogo polItehnIchnogo unIversitetu. — 2010. — Vip.3(11). — C. 139-141. 10. Rodkin D.I., Chernviv A.P., Martvinenko V.A. Obosnovanie kriteriev kachestva preobra-zovaniya energii v elektromehanicheskiih sistemah // Problemyi sozdaniya novyih mashin i tehnologiy. Sb. nauchnyih trudov KGPU, Kremenchug. — 2002. — Vyip.1. — C. 81-85. 11. Lutsenko I.A. Osnovyi teorii effektivnosti. — Kanada : Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., 2012. — 65 c.

Поступила (received) 10.07.2015