

УДК 621.001.57:65.0124

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ К УПРАВЛЕНИЮ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ**

**Луценко И.А., Тытук В.К., Тытук П.В.**  
**Европейский университет**

**Введение.** Большая часть вырабатываемой в мире электроэнергии преобразуется в энергию механического движения рабочих машин в различных областях человеческой деятельности. Основное количество механической энергии приходится на долю промышленности и транспорта. Преобразование электрической энергии в механическую происходит при помощи электроприводов различных видов. Поэтому вопрос развития энергосберегающих технологий весьма актуален для электроприводов.

«Основным видом двигателя, используемого для приведения в движение рабочих машин, является электродвигатель, а основным типом привода при современном уровне развития техники – автоматизированный электропривод», [1]. Так, на долю электромеханических систем с асинхронными двигателями приходится около 50% всей потребляемой в мире электроэнергии, [2]. В соответствии с классическим определением «Автоматизированный электропривод называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением». [1].

Теоретические исследования проблематики энергосбережения в электроприводах закономерно привели к появлению нового класса объектов исследований – электромеханических систем автоматизации ЭМСА. Основным отличием ЭМСА от классического электропривода является использование технологического объекта как главного элемента каждой ЭМСА. Сделан важный вывод о том, что «при рассмотрении вопросов энергосбережения необходимо исходить из того, что при управляемом и неуправляемом электроприводе электромеханическую систему необходимо рассматривать только с учетом технологического объекта», [3].

Вопросы энергосбережения в ЭМСА являются многоплановыми и сложными как в теоретическом, так и в практическом плане. Основные технические мероприятия состоят во внедрении новых устройств с высокими технико-экономическими показателями и определении наиболее выгодных условий работы объектов, разработке критериев оптимальности. Обращает на себя внимание отсутствие единого критерия оценки различных режимов работы ЭМСА с точки зрения эффективности преобразования электроэнер-

гии в механическую. Разработка энергетически эффективных динамических и статических режимов преобразования энергии невозможна до тех пор, пока отсутствует однозначное определение как самого понятия эффективности, так и математически определенных критериев эффективности. Ситуация усугубляется тем фактом, что управление по фактору энергосбережения в электроприводах, управляемых по технологическим критериям, возможно лишь при согласовании с решением основной технологической задачи. При этом энергосберегающий контур управления электроприводом оказывается внутренним, подчиненным контуру управления технологическим процессом.

Как показывает анализ современной научно-технической литературы, основное направление исследований сосредоточено на разработке и внедрении энергосберегающих электродвигателей и устройств, определении наиболее выгодных условий работы объектов, разработки энергосберегающих систем автоматизации для разных отраслей и различного технологического назначения. В качестве критерия оптимальности в энергосберегающих системах управления электроприводами наиболее часто рассматривают энергетические показатели электропривода, такие как максимум к.п.д. или минимуму полных потерь в электроприводе, [4].

Такой подход, который не учитывает особенностей полного цикла производственных процессов, выполняемых рабочей машиной, противоречит основной идее использования электромеханических систем автоматизации ЭМСА и значительно сужает поле исследований энергосберегающих технологий.

Основная идея настоящей работы состоит в том, что при синтезе ресурсосберегающих систем автоматического управления ЭМСА необходимо взаимосвязано оценивать стоимостные параметры входных и выходных продуктов исследуемой системы. В конечном итоге, речь идет о выработке экономического по своей сущности критерия оценки работы ЭМСА. Не обладая информацией о стоимостной оценке результатов работы ЭМСА, невозможно принять обоснованное решение о величине допустимых затрат на создание выходного продукта. Поэтому в условиях отсутствия информации о стоимостных оценках продуктов преобразования синтез ресурсосберегающих систем автоматического управления принципиально невозможен.

Концептуально даний підхід не являється новим. «Економічні критерії мають більш загальний характер, к ним можуть бути сведені критерії інших видів» [5]. Однак реалізувати пропонує підхід раніше не удавалось, т.к. існуючі економічні показники не могли бути безпосередньо використані як критерій управління. «Це пов'язано зі складністю визначення економічних показників з достатньою ступенем точності і достовірності в короткі проміжки часу роботи підприємства» [5].

**Ціль роботи.** Основною метою роботи являється застосування загальної теорії ефективності технологічних процесів [6] до завдань аналізу режимів роботи електродвигунів.

**Матеріал і результати досліджень.** Одним з основних практичних результатів розвитку теорії ефективності стало концептуальне визначення понять ресурсоемкості і ефективності процесів перетворення і отримання математичної моделі для визначення показника ефективності процесу перетворення ресурсів [7, 8], який може бути використаний як критерій управління при побудові ресурсозберігаючих САУ.

Розглянемо можливості застосування теорії ефективності для виявлення особливостей функціонування ЕМСА. Одним з основних умов для практичного застосування цієї теорії є необхідність приведення вхідних і вихідних продуктів системи до загальної системи порівняння. Згідно з наведеним в [1] визначенням електродвигуна, вхідним продуктом ЕМСА є споживана з живильної мережі електроенергія, а вихідним продуктом – результат роботи ЕМСА.

Якщо виникає необхідність розглядати окремо електродвигун як підсистему ЕМСА, то як вихідний продукт може виступати механічна енергія на валу електродвигуна.

Як загальною системою порівняння вхідних і вихідних продуктів ЕМСА необхідно використовувати систему цінних величин.

Для демонстрації запропонованого підходу проаналізуємо процес запуску електродвигуна. Пускові режими не тільки впливають на продуктивність робочої машини, але й, внаслідок їх високої енергоемкості і відносної тривалості, суттєво впливають на показники функціонування ЕМСА в цілому. Розглянемо пуск холосту, електродвигуна постійного струму. Припустимо, що запуск двигуна здійснюється від джерела живлення з лінійно змінюваним від 0 до  $U_{ном}$  напругою. При вибраних умовах найважливішою характеристикою, що визначає енергетичні показники пускового процесу, буде вважатися час розгону живильної

напруги. Цей приклад при всій його схематичності і великій кількості спрощувальних допущень дозволить наочно продемонструвати порядок роботи для використання показника ефективності, переваги показника ефективності перед традиційними критеріями, особливо поведінку нових критеріїв управління. Хоча даний приклад обраний з демонстраційних цілей, отримані результати можуть бути використані при розробці систем косвенного запуску електродвигунів промислових механізмів, [9]. При холостому запуску як вихідний продукт електродвигуна слід розглядати нове, енергетично більш високе робоче стан – обертання з швидкістю холостого ходу. Цінна оцінка вихідного продукту в цьому випадку визначається виходячи з цінності витраченої на запуск двигуна електроенергії в найбільш енергетично навантаженому режимі прямого запуску на повну напругу живлення.

На рис.1 представлені результати дослідження ефективності процесу запуску двигуна постійного струму, отримані шляхом математичного моделювання в системі MATLAB/Simulink. Як моделювання електродвигуна була використана типовий модель двигуна постійного струму незалежного збудження, [10], доповнена блоками обчислення показника ефективності згідно з вираженням 1, [8].

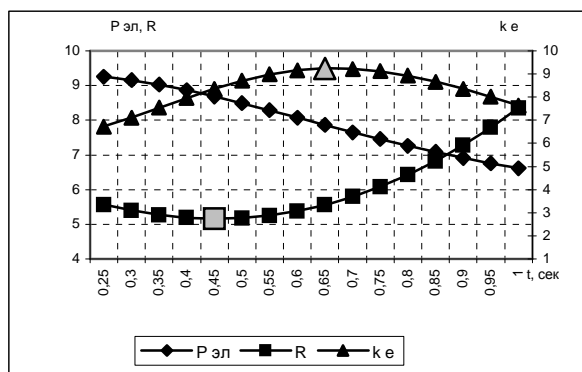


Рисунок 1 – Залежність показників процесу запуску від часу розгону живильної напруги

$$E = \frac{\int_{t_l}^{t_l+\Delta} \left[ \int_0^n \left( \int_0^t pe(d) dd \right) dt - \int_0^n \left( \int_0^t re(d) dd \right) dt \right] dn}{\int_0^{t_l} \left[ \int_0^n \left( \int_0^t re(d) dd \right) dt - \int_0^n \left( \int_0^t pe(d) dd \right) dt \right] dn} \quad (1)$$

де  $t_l$  – момент логічного завершення операції [18];

$\Delta$  – одиничний інтервал часу;

$re$  - стоимостная оценка входных продуктов технологической операции;

$pe$  - стоимостная оценка выходных продуктов технологической операции;

$E$  - показатель эффективности.

На этом рисунке ряд 1 представляет собой энергоемкость процесса запуска (фактически потребленная за период запуска электроэнергия), ряд 2 – ресурсоемкость процесса запуска, определенная в смысле общей теории эффективности, ряд 3 – показатель эффективности процесса запуска. Как и следовало ожидать, при увеличении длительности пускового процесса полная энергоемкость процесса запуска, вычисленная как

$$A = \int_0^t (U_t \times I_t) dt . \quad (2)$$

монотонно снижается при увеличении длительности запуска. Таким же образом ведут себя и полные потери на активных сопротивлениях электропривода. Таким образом, управление по минимуму потерь или минимуму энергопотребления в данном случае приведет к необходимости неограниченного увеличения времени запуска. Это связано с тем, что потребление электроэнергии описывает только одну сторону процесса преобразования ресурсов и принципиально не отражает процессов получения положительного эффекта работы электропривода. В связи с этим величина энергоемкости процесса, как и величина потерь в электроприводе, не могут быть использованы в качестве критерия, оценивающего процесс запуска.

Показатели ресурсоемкости и эффективности при запуске электропривода всегда имеют четко выраженные экстремумы. Снижение значения показателя эффективности при малом времени разгона электропривода объясняется тем, что энергозатраты при увеличении интенсивности запуска растут, а стоимость выходного продукта электропривода остается неизменной. При слишком медленном запуске показатель эффективности также должен уменьшаться в связи со значительным снижением производительности технологического процесса в целом. Поэтому можно высказать гипотезу об универсальности экстремального характера зависимости показателя эффективности от интенсивности технологического процесса, в рассмотренном случае – от времени запуска электропривода. Повышение интенсивности технологического процесса вначале сопровождается повышением эффективности процесса преобразования ресурсов. Опережающий характер роста затрат при интенсификации процессов приводит к тому, что их стоимостная оценка становится соизмеримой с оценкой выходных продуктов, а показатель

эффективности начинает снижаться. Таким образом, оптимальная эффективность процесса преобразования является компромиссом между затратами на его осуществление и производительностью этого процесса.

Обращает на себя внимание тот факт, что положение экстремумов ресурсоемкости и показателя эффективности на оси времени не совпадает.

Рассмотрим, как изменяется эффективность процессов преобразования энергии электроприводом при учете момента сопротивления холостого хода. В соответствии с результатами исследований, выполненных в [9], используем математическую модель момента сопротивления холостого хода, изложенную в [10]. Зависимость момента сопротивления холостого хода от угловой скорости привода представим в виде следующей математической зависимости:

$$\bar{m} = 0,05 + 0,25 \cdot \exp(-a \cdot \bar{w}) \quad (3)$$

где  $\bar{w}$  - относительная угловая скорость электропривода,  $\bar{m}$  - относительное значение момента сопротивления холостого хода,  $w$  - константа, зависящая от параметров электропривода, условий окружающей среды и т.п.

Появление дополнительной нагрузки на валу электропривода закономерно приводит к увеличению длительности запуска и росту энергопотребления и полных потерь в электроприводе за период запуска. Соответственно, это приводит к увеличению ресурсоемкости процесса пуска и снижению его эффективности. Как показывают результаты математического моделирования, минимальное значение ресурсоемкости процесса пуска вырастает при заданных условиях на 16%, а значение показателя эффективности снижается на 18.8%. Экстремальный характер изменения ресурсоемкости и показателя эффективности остается неизменным, рис.2.

Важное методологическое значение имеет вопрос о расположении экстремальных значений ресурсоемкости и показателя эффективности на оси времени. Как видно из графиков, представленных на рис.2., наличие момента сопротивления приводит к существенному изменению величины и расположения точки экстремума показателя эффективности. Это полностью согласуется с высказанным в [3] положением о том, что «электромеханическую систему необходимо рассматривать только с учетом технологического объекта». Энергосберегающее управление электроприводом невозможно без тщательного учета особенностей функционирования рабочей машины.

С чем же связано снижение абсолютного значения показателя эффективности и рост ресурсоемкости процесса запуска? Очевидно, что необходимость преодоления момента сопротивления хо-

лостого хода приводит к росту непроизводительных затрат, к увеличению стоимостной оценки потребленной электроприводом в процессе запуска электроэнергии. Это приводит к непосредственному росту ресурсоемкости процесса запуска. Снижение же показателя эффективности процесса связано с изменением соотношения стоимостных оценок выходного и входного продуктов процесса запуска. Рассматривая соотношение упомянутых выше стоимостных оценок, мы естественным образом приходим к понятию, полностью аналогичному рентабельности в экономических операциях. Появление дополнительных затрат на процесс запуска в виде сопротивления холостого хода приводит к снижению относительной стоимостной оценки выходного продукта, что, в свою очередь, и обуславливает снижение показателя эффективности процесса запуска в целом.

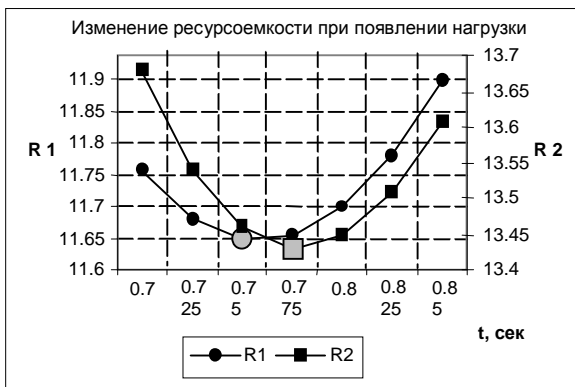


Рисунок 2 – Изменение ресурсоемкости и эффективности запуска электропривода без (1) и с учетом (2) момента сопротивления холостого хода

Рассмотрим вопрос о влиянии величины стоимостной оценки выходного продукта на оптимальную в смысле максимума эффективности интенсивность технологического процесса ЭМСА. Интуитивно ясно, что чем выше стоимостная оценка выходного продукта, тем быстрее этот продукт должен быть получен. Эта оценка наглядно под-

тверждается результатами математического моделирования, рис.3.

Стоимостная оценка выходного продукта процесса запуска возрастает от ряда ke1 до ряда ke3.

Максимальные значения зависимостей показателей эффективности от времени соединены дополнительной кривой. Абсолютные значения максимальных показателей эффективности возрастают с увеличением стоимостной оценки выходного продукта. Оптимальное с точки зрения эффективности время запуска с ростом оценки выходного продукта уменьшается.

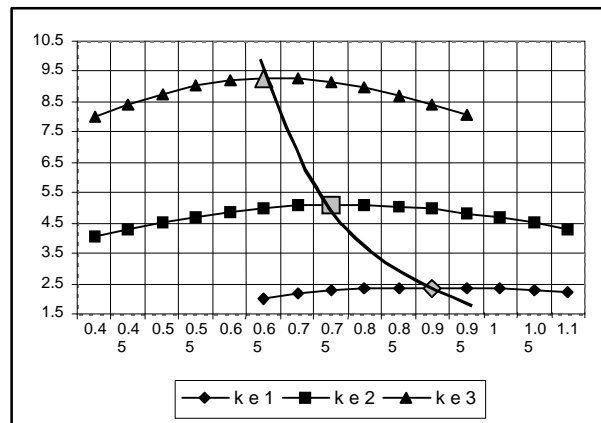


Рисунок 3 – Зависимость оптимального времени развертки напряжения питания от стоимостной оценки выходного продукта электропривода

Рассматривая запуск электропривода как основной процесс в системе косвенного пуска электропривода технологического механизма, полученный результат можно интерпретировать следующим образом. Если стоимость работы технологического механизма высока, то запуск необходимо выполнять максимально быстро, что обеспечит рост производительности технологического процесса в целом. При снижении потребности в работе технологического механизма соответственно снижаются требования и к темпу его запуска, а оптимальное с точки зрения эффективности время запуска неограниченно возрастает.

При повышении общей стоимости выходного продукта подсистемы высшего иерархического уровня, подсистемы более низкого иерархического уровня «выгоднее» делать более быстрыми несмотря на некоторое возрастание уровня затрат (конечно, не такое быстрое, по отношению к росту производительности). Так как ЭМСА практически никогда не располагаются на высшем иерархическом уровне управления предприятия, то критерии эффективного управления ЭМСА не могут быть автономными, они должны быть согласованы с подсистемой управления более высокого иерархического уровня.

Предложенный в настоящей работе подход к выбору оптимального по эффективности времени запуска может быть использован для решения такой важной задачи, как выбор электрооборудования для систем косвенного запуска. Рассмотрим систему косвенного пуска главного электропривода экскаватора. Ранее выбор пускового привода постоянного тока осуществлялся произвольно, а выбор электрооборудования производился исключительно из технических критериев, обеспечивающих общую работоспособность системы косвенного пуска. Теперь выбор пускового привода и пусковых устройств может быть выполнен обоснованно, исходя из токовых нагрузок, обеспечивающих оптимальное по эффективности время запуска. Модификации этого подхода могут быть использованы и в других задачах выбора электрооборудования.

Диапазон применения показателя эффективности процессов далеко не исчерпывается анализом пусковых процессов электроприводов. Очевидно, что настройки замкнутых систем управления электроприводов, настроенные по техническому или симметричному оптимуму, не обладают оптимальными показателями с точки зрения эффективности и ресурсоемкости. Однако основная область применения предложенного критерия на наш взгляд – это замкнутые системы управления технологическими процессами с регулируемым электроприводом. Параметры системы управления электроприводом и режимы его работы должны устанавливаться в соответствии с изменением общей стоимости выходного продукта подсистемы высшего иерархического уровня, обеспечивая снижение ресурсоемкости технологического процесса в целом.

**Выводы.** 1. Для оценки ЭМСА с точки зрения эффективности процессов потребления и преобразования энергетических ресурсов предложено применить показатели ресурсоемкости и эффективности, предложенные общей теорией эффективности сложных систем.

2. Высказана гипотеза об экстремальной зависимости показателей ресурсоемкости и эффективности ЭМСА от степени интенсивности технологических процессов. Получено экспериментальное обоснование этой гипотезы для процесса запуска электропривода.

3. Определен характер зависимости ресурсоемкости и показателя эффективности процесса за-

пуска от величины стоимостной оценки выходного продукта.

4. При разработке и эксплуатации ресурсосберегающих систем управления ЭМСА необходимо учитывать явную подчиненную связь с подсистемой управления более высокого иерархического уровня и обязательное сквозное согласование критериев оценивания и управления, которые используются на всех иерархических уровнях системы управления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. -6-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с., и
2. Попович Н.Г., Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Король С.В. Энергетически эффективные алгоритмы управления асинхронными двигателями электромеханических систем.
3. Попович Н.Г., Печеник Н.В. Электромеханические системы автоматизации и задача энергосбережения.
4. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. Кишинев.: Штиинца, 1982.
5. Моделирование и управление горнорудными предприятиями. С. Каграманян, А.С. Давидкович, В.А. Малышев и др. - М.: Недра, 1989, - 360 с.:и
6. Луценко И.А. Технологии эффективного управления. ПП «Видавничий дім», 2004г., 152 с..
7. Луценко И.А. Показатель ресурсоемкости технологического процесса.// Інформаційні системи і моделювання. - Кременчук. КДПУ, - Вип.2(11). 2004. - 303 - 37.
8. Показатели эффективности сложных управляемых процессов.// Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Аерокосмічні системи моніторингу та керування». НАУ, 2003, - с.24.139-24.142.
9. Исследование и пути повышения эффективности пусковых систем синхронных двигателей в электроприводах промышленных механизмов./ Э.Н. Гречко, Д.И. Родькин, А.П. Черный и др. - Киев, 1993. - 48с. (Препринт АН Украины, Институт проблем энергосбережения; 93-3).
10. Моделирование электромеханических систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001.-376 с.

Статья поступила 15.12.2004 г.  
Рекомендовано к печати д.т.н., проф.  
Доровской В.А.