DOI: 10.17117/na.2015.11.03.368

<http://ucom.ru/doc/na.2015.11.03.368.pdf>

Поступила (Received): 28.11.2015

Савченко А.В., Акуленко А.Е.

Методология определения КПД и эффективности использования электроэнергии автоматизированных электроприводов и автоматизированных систем управления технологическими процессами

Savchenko A.V., Akulenko A.E.

Methodology for determining the efficiency and the energy efficiency of the automated electric drive and automation systems process control

Предлагаемая авторами методология определения КПД и эффективности использования электроэнергии автоматизированными электроприводами (АЭП) и автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП) позволяет выявлять оптимальные (по технологическим критериям и критериям энергетической эффективности) режимы работы АЭП и АСУ ТП. В качестве примера методология изложена применительно к АЭП в составе АСУ ТП водоснабжения и водоотведения (оборотного водоснабжения)

The authors proposed methodology for determining the efficiency and effectiveness of the use of electricity automated electric drive (AED), and automated control systems of technological processes (ACSTP) allows to identify the optimal (according to the technological criteria and to the criteria of energy efficiency) modes of operation the AEDs and ACSTPs. As an example, the methodology described with respect to AEDs within ACSTP of water and wastewater (water recycling)

Ключевые слова: энергосбережение, экономия электроэнергии

Key words: energy conservation, energy saving

Савченко Александр Владимирович

Кандидат технических наук, доцент
Южно-Российский государственный
политехнический университет им. М.И. Платова
г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Savchenko Aleksandr Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
South-Russian state technical university
named M.I. Platov
Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132

Акуленко Анастасия Евгеньевна

Студент
Южно-Российский государственный
политехнический университет им. М.И. Платова
г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Akulenko Anastasia Evgenievna

Student
South-Russian state technical university
named M.I. Platov
Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132

Известно, что в настоящее время для реализации одного и того же требуемого технологического процесса, имеется возможность применения различных

технических решений в кинематике исполнительных механизмов, в структурной и принципиальной схемах построения систем автоматизированного электропривода, а также алгоритмах и принципах их управления и т.д. При всем многообразии этих технических решений появляется потребность в адекватной оценке и сравнительной характеристике каждого из них, в частности, по показателю энергетической эффективности.

11 ноября 2009 года Государственной Думой РФ был принят Федеральный закон «Об энергосбережении...», и 18 ноября 2009 года он был одобрен Советом РФ, который регулирует отношения, возникающие в процессе деятельности в области энергосбережения, в целях создания экономических и организационных условий для эффективного использования энергетических ресурсов. Кроме того, в настоящее время имеется несколько десятков государственных стандартов на промышленное оборудование, машины, приборы, которые относятся к стандартам энергетической эффективности, поскольку основное их назначение в регламентации показателей энергетической эффективности этого оборудования. Разработан ряд нормативных и методических документов по энергетическим обследованиям и энергопаспортизации, в которых нашли отражение показатели энергетической эффективности технологических процессов. В государственной и отраслевой статистике имеется более десятка форм, в которых отражены показатели энергопотребления и эффективности энергоиспользования на предприятиях, в отраслях, регионах, на макроуровне экономики.

Согласно нормативным документам показатель энергетической эффективности – абсолютная или удельная величина потребления или потери энергетических ресурсов для продукции любого назначения. Эта формулировка не даёт однозначного определения показателю **эффективности использования электроэнергии** ε , так как для расчета эффективности предлагаются четыре различных по своей сущности величины: а) «абсолютная»; б) «удельная»; в) «потребление»; г) «потери». И (кроме того), в различной технической литературе так же встречаются противоречивые толкования определения эффективности использования электроэнергии. Рассмотрим некоторые из предлагаемых показателей эффективности использования электроэнергии:

1. Согласно при выполнении рабочими механизмами технологических установок простых функций с однонаправленной передачей и преобразованием энергии, используется в качестве показателя эффективности использования электроэнергии – коэффициент полезного действия (КПД) – отношение «полезной работы» на выходе устройства $W_{\text{полез}}$ к затраченной энергии на входе устройства W_{Σ} :

$$\eta = \frac{W_{\text{полез}}}{W_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Недостатком этой формулы является, то, что на участках разгона или торможения двигателя и при работе двигателей на холостом ходу (ХХ) КПД имеет определенное значение, а эффективность использования электроэнергии равна нулю.

2. На практике, зачастую возникают затруднения при использовании понятия КПД связанные, «во-первых, с неопределенностью в силу возможной

неоднаправленности потока энергии понятия «полезная мощность или энергия»; во-вторых, с многоэлементностью силового канала и неодинаковостью энергетических свойств отдельных элементов и, в-третьих, с объективной сложностью временной характеристики процесса передачи и преобразования энергии в конкретных условиях». По этой причине в предлагается определять эффективность использования электроэнергии:

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{пол.з}}}{W_{\text{пол.з}} + \sum W_{\Delta}}, \quad (2)$$

где W_{Δ} – потери энергии в каждом элементе силового канала.

По данной формуле значение ε будет иметь более высокое значение, чем фактическое, так как $\sum W_{\Delta}$ – не учитывает, расход электроэнергии на разгон и торможение всех движущих звеньев автоматизированного электропривода (АЭП), т.е. кинетическую энергию.

3. Показатели экономичности энергопотребления могут быть выражены в абсолютной или удельной форме. Абсолютная форма характеризует расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в регламентированных условиях (режимах) работы. Удельная форма характеризует отношение расхода ТЭР к вырабатываемой или потребляемой энергии, произведенной продукции, произведенной работе в регламентированных условиях (режимах) работы.

Поэтому, еще одним показателем эффективности использования электроэнергии предлагается использовать удельный расход w на единицу продукции A или вида работ при определенных условиях производства:

$$w = \frac{W}{A}. \quad (3)$$

Однако более низкий удельный расход, достигнутый в производстве, или более низкая норма расхода электроэнергии на планируемый период сами по себе (без структуры затрат) не являются полными показателями эффективности.

4. При сравнительной оценке различных режимов работы технологической установки на практике известно применение критерия эффективности использования электроэнергии, как наиболее объективного показателя при оценке энергетической эффективности технологических установок:

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{пол.з}}}{\sum_i P_i \cdot t_i}, \quad (4)$$

где P_i – мощность, потребляемая на i -том участке графика нагрузки; t_i – продолжительность i -того участка.

Очевидно, что в зависимости от конкретного случая режима работы установки возможно применение того или иного из указанных показателей эффективности использования электроэнергии. Так, для определения энергетической эффективности технологических установок, выполняющих простые функции с однонаправленной передачей и преобразованием энергии применяется

(1), а для определения энергетической эффективности установок с непрерывным режимом работы (например, установки оребрения) целесообразным является применение (2), для турбомеханизмов – (3). В случае установок с периодическими режимами работы (металлообрабатывающие станки и др.) целесообразно использовать (4).

В случае многокритериальной оценки режима работы технологической установки по эффективности использования электроэнергии, производительности и техническому состоянию установки, с учетом специфики ее режима работы (в т.ч. коэффициента загрузки приводного двигателя по мощности) предлагается использовать **расчет эффективности использования электроэнергии** учитывающий относительную производительность α , коэффициент загрузки β (отношение удельной «полезной энергии» $w_{\text{полн}}$ к номинальному удельному расходу $w_{\text{ном}}$) и коэффициент мощности ξ (отношение полной потребляемой $P_{\text{полн}}$ к номинальной мощности $P_{\text{ном}}$) технологической установки. Эту связь целесообразно представить, с учетом преобразования (4),

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{полн}}}{\sum_i P_i \cdot t_i} = \frac{W_{\text{полн}}}{P_{\text{полн}} \cdot t} = \frac{w_{\text{полн}} \cdot A}{P_{\text{полн}} \cdot t}$$

где t – полное время работы технологической установки.

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{полн}} \cdot t_{\text{раб}}}{P_{\text{полн}} \cdot t} \Big|_{t_{\text{раб}}=t} = \frac{P_{\text{полн}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{w_{\text{полн}} \cdot A}{P_{\text{полн}}}$$

Домножив на $\frac{P_{\text{ном}} \cdot A_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} \cdot A_{\text{ном}}}$ и сгруппировав множители получаем

$$\varepsilon = \frac{w_{\text{полн}} \cdot A}{P_{\text{полн}}} \cdot \frac{P_{\text{ном}} \cdot A_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} \cdot A_{\text{ном}}} = \frac{A}{A_{\text{ном}}} \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{полн}}} \cdot \frac{A_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} \cdot w_{\text{полн}}$$

где $A_{\text{ном}}$ – работа, выполненная технологической установкой при номинальном режиме работы,

Учитывая, что $\frac{A}{A_{\text{ном}}} = \alpha$, $\frac{A_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{1}{w_{\text{полн ном}} / t}$, $\frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{полн}}} = \xi$

$$\varepsilon = \frac{A}{A_{\text{ном}}} \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{полн}}} \cdot \frac{A_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} \cdot w_{\text{полн}} \left| \begin{array}{l} \frac{A}{A_{\text{ном}}} = \alpha \\ \frac{A_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{1}{w_{\text{полн ном}} / t} \\ \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{полн}}} = \xi \end{array} \right. = \alpha \cdot \frac{w_{\text{полн}}}{w_{\text{полн ном}}} \cdot \xi \Big|_{\frac{w_{\text{полн}}}{w_{\text{полн ном}}} = \beta} = \alpha \cdot \beta \cdot \xi. \quad (1)$$

или

$$\varepsilon = \alpha \cdot \beta \cdot \xi.$$

Таким образом, выражение (5) представляет собой универсальную зависимость, связывающую эффективность использования электроэнергии технологической установки с ее производительностью α , коэффициентом загрузки β и коэффициентом мощности ξ в относительных единицах.

Для измерения составляющих эффективности использования электроэнергии не требуется применения специальных (сложных) измерительных приборов. Производительность установки α обычно учитывается за определенные отрезки времени (час, смена, сутки, месяц и т.д.) технологическими службами предприятия. Коэффициент загрузки β с достаточной степенью точности определяется по паспортным данным установки. Для определения коэффициента мощности ξ необходимы сравнительно простые приборы (амперметр и вольтметр или ваттметр).

Разработанная авторами методология апробирована и неоднократно подтверждена в процессе экспериментальных исследований и математического моделирования различных АСУ ТП, в том числе в процессе физического моделирования АСУ ТП водоснабжения и водоотведения (ВиВ) на учебно-исследовательском стенде кафедры «Электроснабжение и электропривод» ФГБОУ ВПО ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова. Основное оборудование, примененное в составе физической модели АСУ ТП ВиВ состоит из преобразователя частоты (ПЧ) серии VLT® 8000 AQUA (табл. 6) и насосного агрегата (НА) серии СН1 2-60 (табл. 3) в составе приводного двигателя (Д) и насоса (Н), каждый характеризующийся своими основными энергетическими показателями – мощностью P , КПД η (рис. 1).

Рис. 1. Обобщенная структурная схема силового канала АСУ ТП ВиВ

Потребленная из сети электроэнергия со стороны основного электрооборудования АСУ ТП ВиВ преобразуется в энергию водяного потока, характеризующегося своим напором H и подачей Q . Потребители связаны с НА посредством гидравлической распределительной и технологической систем в составе трубопроводов и специальной регулирующей арматуры. Встречая на своем пути сопротивление гидравлической распределительной и технологической систем $S_{Q,H}$, энергия водяного потока снижается до уровня $W_{АСУ ТП ВиВ \text{ полез}}$ (рис. 2), необходимого (затрачиваемого) непосредственно на подъем определенного количества объема воды V на высоту h за время t к потребителям системы водоснабжения (водоотведения).

Рис. 2. Энергетическая диаграмма АСУ ТП ВиВ

В некоторых лабораторных экспериментальных исследованиях, где удалось напрямую определить численное значение $W_{АСУ ТП ВиВ \text{ полез}}$ в качестве показателя энергетической эффективности технологического процесса целесообразно было использовать характеристику КПД всей АСУ ТП ВиВ, преобразованное из (1) в выражение (6):

$$\eta_{АСУ ТП ВиВ} = \frac{W_{АСУ ТП ВиВ \text{ полез}}}{W_{АСУ ТП ВиВ}} \quad (6)$$

В соответствии с вышеизложенным **эффективность использования электроэнергии ϵ** по (5) представляет собой комплексный критерий оценки качества режимов работы технологической установки. При этом позволяет определять оптимальный (энергоэффективный) режим работы технологической установки с учетом показателей α , β , ξ (параметров, характеризующих режим работы, параметры ТП и технологической установки) и, следовательно, целенаправленно принимать меры для их улучшения. Также с применением (5) появляется возможность проводить сравнительный анализ энергетической эффективности режимов работы технологической установки или сравнительный анализ энергетической эффективности различных установок, учитывая техно-

логические особенности режимов работы каждой из них. При этом в ряде случаев, когда удастся точно определить численное значение $W_{\text{полез}}$, затраченной непосредственно на реализацию ТП (посредством АСУ ТП или АЭП) в качестве показателя энергетической эффективности ТП целесообразно использовать характеристику мгновенных значений КПД ($\eta_{\text{АСУ ТП}}$ или $\eta_{\text{АЭП}}$) определенных по (6) – в качестве альтернативы показателям $\varepsilon_{\text{АСУ ТП}}$ или $\varepsilon_{\text{АЭП}}$ (соответственно).

Список используемых источников:

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. ГОСТ Р 51541-99 – Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения.
3. ГОСТ Р 51387-99 Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения.
4. ГОСТ Р 51380-99 Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. Общие требования.
5. Ильинский Н.Ф., Рожановский Ю.В., Горнов А.О. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе. М.: Высш. шк., 1989. 127 с.
6. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001.
7. Авилов-Карнаухов Б.Н., Зюбровский Л.Г. Экономия электроэнергии на рудообогатительных фабриках. М.: Недра, 1987, 160 с.
8. Авилов-Карнаухов Б.Н. Электроэнергетические расчёты для угольных шахт. М.: Недра, 1969. 104 с.
9. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Обобщенный критерий энергетической эффективности электропривода. М.: Информэлектро, 1987.
10. Н.Ф. Ильинский, А.О. Горнов. Критерии эффективности процесса электромеханического преобразования электроэнергии // Электричество. 1987. №10. С. 24–29.
11. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. М.: Недра, 2000. 487с.
12. Анчарова Т.В., Гамазин С.И., Шевченко В.В. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства. Кн. 5. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Высш. шк., 1990. 143 с.
13. Савченко А.В., Зюбровский Л.Г., Пятибратов Г.Я. Повышение производительности технологической установки с учетом эффективности использования электроэнергии электроприводом // Изв. вузов. Электромеханика. 2003. № 5. С. 46-49.
14. Савченко А.В. Показатели эффективности использования электроэнергии технологических установок с электроприводом // Новые технологии управления движением технических. Новочеркасск; Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ, 2004. Вып. 5. С. 62-65.
15. Савченко А.В., Луценко А.С., Добродей В.Н. Экономия электроэнергии в системах автоматизированного управления технологическим процессом водоснабжения // Студенческая научная весна-2015. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2015. С. 120-121.
16. Савченко А.В., Никифоров Б.В., Апилов В.Р., Темирев А.П., Гайдай Б.В., Чугунов В.И., Федоров А.Е., Цветков А.А. Эффективность использования электроэнергии и энергосбережение средствами современного электропривода // Силовая электроника в бортовых системах электроснабжения и электроприводах. Ростов н/Д: Ирис, 2003. С. 76-78.
17. Савченко А.В., Зюбровский Л.Г. Методы оптимизации и экономного потребления электроэнергии при металлообработке. Новочеркасск, 2002. 25 с.
18. Савченко А.В., Колчанов И.С., Шалыто А.А. Исследование законов управления насосными агрегатами в системе жилищно-коммунального хозяйства // Мехатроника и робототехника. Современное состояние и тенденции развития. Новочеркасск : ЛИК, 2010. С. 135-139.
19. Савченко А.В., Зюбровский Л.Г. Метод исследования потребления электроэнергии // Интеллект молодых – новому веку. Новочеркасск: Набл, 2001. С. 118-119.
20. Савченко А.В., Зюбровский Л.Г. Метод исследования потребления и эффективности использования электроэнергии основными приводами металлорежущих станков //Кибернетика электрических систем. Новочеркасск: Изв. вузов. Электромеханика, 2002. С. 28-29.

21. Савченко А.В., Зюбровский Л.Г. Расчёт эффективности использования электроэнергии металлорежущими станками (на примере токарной обработки) Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы. Новочеркасск: ТЕМП, 2002. С. 34-35.
22. Савченко А.В., Зюбровский Л.Г. Оптимизация потребления электроэнергии основными электроприводами металлорежущих станков. Новочеркасск: Набла, 2003. С. 155-156.
23. Савченко А.В., Пятибратов Г.Я., Зюбровский Л.Г. Интенсификация технологического процесса – один из важнейших путей повышения эффективности использования электроэнергии // Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2003. С. 44-45.
24. Богданов Д.Ю., Катюхина Д.И., Савченко А.В. Методика расчета эффективности использования электроэнергии в автоматизированных электроприводах систем водоснабжения и водоотведения // Электромеханика. 2014. №3. С. 67-70.

© 2015, Савченко А.В., Акуленко А.Е.
 Методология определения КПД и эффективности
 использования электроэнергии
 автоматизированных электроприводов и
 автоматизированных систем управления
 технологическими процессами

© 2015, Savchenko A.V., Akulenko A.E.
 Methodology for determining the efficiency and the
 energy efficiency of the automated electric drive and
 automation systems process control