

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140612>

УДК 681.5

Л 73

ON ASSESSMENT SYSTEM OF ENERGY EFFICIENCY OF THE MODERN MOTOR DRIVE

О СИСТЕМЕ ОЦЕНОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Valentyn I. Lokariev
valentyn.lokariev@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8776-3286

В. И. Локарев,
д-р техн. наук, проф.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The assessment system of the energy state of the modern motor drive can be briefly characterized as follows. When we consider the traditional factors like the coefficient of efficiency and $\cos \varphi$, the coefficient of efficiency which demonstrates the efficiency of the conversion of electric energy into mechanical energy meets the needs of the practice in the context of a simple power channel which is not burdened with the multidirectional energy flows and does not contain any additional converter devices. In case of the complex power channel, when it has the multidirectional energy flows, the coefficient of efficiency gives the conflicting, ambiguous results and therefore its use is not justified. The second factor which is traditionally used to assess the energy consumption efficiency is limited and ineffective. Consequently, there are modes of the motor drive which cannot have any quantitative assessment of their efficiency. In some cases, it complicates the implementation of energy-saving measures and the selection of the optimal technical solutions. The so-called generalized efficiency factor of the electromechanical energy conversion has been proposed to overcome the difficulties listed above. It restricts the use of the notion «useful output» and is applicable for the energy flows of different signs. The use of the power factor $\cos \varphi$ as a measure of the energy efficiency of the motor drive is abolished, and the new consumption efficiency factor is proposed instead. In the article, the generalized method is briefly described with the comments where complexities of its comprehension are considered. Concurrently, the assessment system based on the information properties of the typical elements of the power channel is considered. According to the results, it completely coincides with the «generalized» method. The obtained dependencies of the suggested factors on the traditional ones enable determining the former according to the catalog data of the motor.

Keywords: induction motor drive; power channel; energy process; the criterion of energy efficiency.

Аннотация. Охарактеризовано состояние системы оценок энергетической эффективности современного электропривода. Дано краткое изложение метода обобщенного критерия. Предложена версия расчета показателей эффективности, которая основана на функциональных свойствах элементов силового канала электропривода и совпадает по результатам с известной, но в большей степени соответствует учебным целям, и для которой обобщение возможно, но не обязательно. Получены соотношения между предложенными и традиционными показателями эффективности для электропривода с простым силовым каналом, не содержащим дополнительных преобразовательных устройств. Рассмотрен способ определения показателей эффективности по каталожным данным.

Ключевые слова: асинхронный электропривод; силовой канал; энергетический процесс; критерий энергетической эффективности.

Анотація. Охарактеризовано стан системи оцінок енергетичної ефективності сучасного електропривода. Дано стислий виклад методу узагальненого критерію. Запропоновано версію розрахунку показників ефективності, яка базується на функціональних властивостях елементів силового каналу електропривода і збігається за результатами з відомою, але в більшій мірі відповідає навчальним цілям, для якої узагальнення можливе, але не обов'язкове. Отримано співвідношення між запропонованими і традиційними показниками ефективності для електропривода з простим силовим каналом, що не містить додаткових перетворювальних пристроїв. Розглянуто спосіб визначення показників ефективності за каталожними даними.

Ключові слова: асинхронний електропривод; силовий канал; енергетичний процес; критерій енергетичної ефективності.

REFERENCES

- [1] Kravchek A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya Ye.A. *Asinkhronnye dvigateli serii 4A* [4A series induction motors]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
- [2] Ilinskiy N.F., Gornov A.O. Kriteriy effektivnosti elektromekhanicheskogo preobrazovaniya energii [Criterion of the efficiency of the electromechanical energy conversion]. *Elektrichestvo – Electricity*, no. 10, 1987, pp. 24–29.
- [3] Ilinskiy N.F., Rozhankovskiy Yu.V., Gornov A.O. *Energoberegayushchaya tekhnologiya energosnabzheniya narodnogo khozyaystva. Kn. 2. Energoberezhenie v elektroprivode* [Energy-saving technology of the energy delivery to the national economy. Book 2. Energy saving in the motor drive]. Moscow, Vysshaye shkola Publ., 1989. 127 p.
- [4] Kitaenko G.I. *Spravochnik sudovogo elektromekhanika. T. 1. Sudovye elektroenergeticheskie sistemy i ustroystva* [Electrical officer guide. Vol. 1. Ship electric-power systems and facilities]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1980. 528 p.
- [5] Lokarev V.I. *Energoberezhenie v elektroprivode* [Energy saving in the motor drive]. Nikolaev, NUK Publ., 2009. 196 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Система оценки энергетической эффективности современного электропривода переживает серьезные трудности, связанные с несостоятельностью в ряде случаев традиционных показателей КПД и $\cos \varphi$. Не вызывая затруднений в простейших случаях, эти показатели оказываются неинформативными, приводят к неубедительным и противоречивым результатам в сложных энергетических процессах [2].

Возникает задача – усовершенствовать систему оценок энергетической эффективности электропривода, чтобы получить критерии эффективности, точно и непротиворечиво характеризующие энергетические процессы электропривода во всем многообразии возможных режимов и с силовыми каналами любой сложности.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Обобщенный критерий эффективности процесса электромеханического преобразования энергии предложен в [2], некоторые его аспекты рассмотрены в [3]. Обобщенный критерий энергетической эффективности призван разрешить проблемы, возникшие в энергетике современного электропривода, в том числе связанные с усложнением энергетических процессов в силовом канале электромеханизма.

Новизна возникших задач, сложность исходного математического описания, необычность обобщенной формы критерия и неудобная для восприятия логическая последовательность его изложения затрудняют усвоение материала.

В настоящей работе кратко изложен метод обобщенного критерия и рассмотрен вариант формирования показателей энергетической эффективности в удобной при обучении логической последовательности (от простого и знакомого к сложному и новому), при условии необязательной (хотя и возможной)

обобщенной формы. Также определены соотношения между полученными показателями эффективности и традиционными.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – привлечь внимание специалистов и студентов к острым проблемам современного электропривода, популяризовать метод обобщенного критерия, способствовать более глубокому раскрытию его особенностей и свойств, содействовать его доступности при обучении.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Существует проблема, ждущая своего решения. Из обсуждаемых в научной периодической литературе по данному вопросу проектов наиболее интересным представляется обобщенный критерий энергетической эффективности электромеханического преобразования энергии [2]. Напомним основные положения этого способа оценки энергетического состояния электропривода.

Для неразветвленного силового канала (рис. 1,а), состоящего из источника питания \mathcal{E}_0 , силовых передающих – преобразовательных элементов $\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_p, \dots, \mathcal{E}_n$, включающих в себя питающую линию \mathcal{E}_1 , электродвигатель \mathcal{E}_p , рабочий орган \mathcal{E}_n и технологический объект \mathcal{E}_{n+1} , будем полагать заданной мгновенную мощность потока энергии N_i между элементами \mathcal{E}_i и \mathcal{E}_{i+1} . Введем для любого сечения i (правее элемента i) понятие требуемой энергии на данном отрезке времени τ :

$$W_i^{t_1, t_1+\tau} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} |N(t)| dt. \quad (1)$$

Энергетический процесс, характеризуемый в каждом сечении требуемой энергией W_p , сопровождается потерями в каждом элементе канала. Обозначив мгновенную мощность потерь в любом j -м элементе ΔN_j , проинтегрируем ее в тех же пределах, что и $W_i^{t_1, t_1+\tau}$, и получим

$$\Delta W_j^{t_1, t_1+\tau} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} \Delta N_j(t) dt. \quad (2)$$

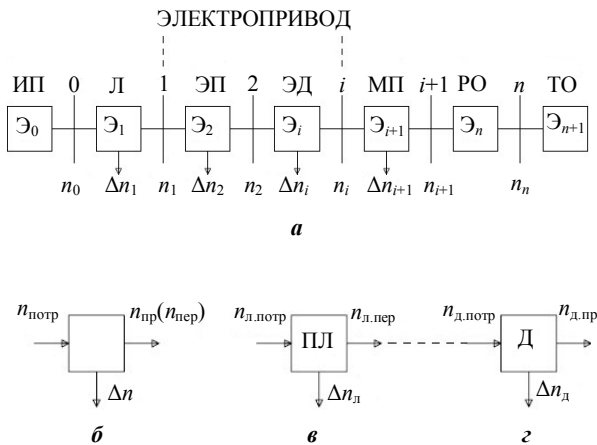


Рис. 1. Общая схема силового канала электропривода (а); произвольный элемент (б); передающая линия (в); преобразующий элемент (двигатель) (г)

На базе величин (1) и (2), используя общепринятую структуру КПД, строим обобщенный критерий эффективности энергетического процесса в силовом канале:

$$W_{i,k-e}^{h_i, s_1+\tau} = \frac{W_i^{h_i, s_1+\tau}}{W_{i,k-l}^{h_i, s_1+\tau} + \sum_{j=k}^l W_j^{h_j, s_1+\tau}}$$

Оценка критерия относится к произвольному сечению силового канала справа от *i*-го элемента, учитывает потери в любых элементах силового канала от *k* до *l*, характеризует процесс на заданном отрезке времени от *t*₁ до *t*₁ + τ (верхний индекс).

Первый нижний индекс при показателе *H*_{*i,k-l*}^{*h*_{*i*}, *s*₁+τ указывает на сечение силового канала, которому соответствует энергия *W*_{*i*}, вторые нижние индексы обозначают номера элементов, потери которых при этом учитываются.}

Если энергетический процесс рассматривается вне связи с интервалом времени, а показатель *H* оценивается для статического режима, верхние (временные) индексы при *H* опускают, а вместо энергии *W* и Δ*W* используют мощности:

$$H_{i,k-l} = \frac{N_i}{N_i + \sum_{j=k}^l \Delta N_j}$$

После перехода от абсолютных величин к относительным получим [5]

$$h_{i,k-l} = \frac{n_i}{n_i + \sum_{j=k}^l \Delta n_j}$$

где *n*_{*i*} = *N*_{*i*} / *N*_н; Δ*n*_{*i*} = Δ*N*_{*i*} / *N*_н; *N*_н – номинальная мощность двигателя.

Учитывая мощности в разных сечениях силового канала, а также элементы, потери в которых при этом принимаются во внимание, определяют те или иные показатели энергетической эффективности.

При определении показателя преобразования *i*-го элемента учитываются мощность *n*_{*i*} в сечении *i* (правее *i*-го элемента) и потери только этого элемента:

$$h_{i,н.п} = \frac{n_i}{n_i + \Delta n_i} \tag{3}$$

При определении показателя потребления *i*-го элемента выбирается мощность *n*_{*i-1*} (левее *i*-го элемента) и учитываются потери только этого элемента:

$$h_{i,п.отр} = \frac{n_{i-1}}{n_{i-1} + \Delta n_i}$$

Показатель эффективности передачи энергии по линии связан с мощностью сечения 1 (правее линии) и учитывает потери только линии Δ*n*_л:

$$h_{л,пер} = \frac{n_1}{n_1 + \Delta n_1} = \frac{n_{л,пер}}{n_{л,пер} + \Delta n_{л}} \tag{4}$$

При определении показателя эффективности преобразования энергии собственно электроприводом *h*_{эн.пр} (без механического преобразования МП) учитывается мощность *n*_{*i*}, связанная с сечением *i* (правее двигателя) и потерями всех элементов, кроме первого, т. е. линии:

$$h_{эн.пр} = \frac{n_i}{n_i + \sum_2^i \Delta n_j} = \frac{n_{л,пр}}{n_{л,пр} + \Delta n_{эн.} + \Delta n_{д}}$$

Коэффициент эффективности потребления энергии электроприводом *h*_{эн.потр} рассчитывается исходя из мощности *n*₁, связанной с сечением 1 (правее передающей линии) и потерями всех элементов, начиная со второго:

$$h_{эн.потр} = \frac{n_i}{n_1 + \sum_2^i \Delta n_j} = \frac{n_{л,пер}}{n_{л,пер} + \Delta n_{эн.} + \Delta n_{д}}$$

Для оценки эффективности передачи – преобразования всего силового канала учитывается мощность, связанная с сечением *n* (рабочий орган), и потерями мощности всех элементов силового канала без исключения (потерями рабочего органа пренебрегаем ввиду их малости):

$$h_{сп} = \frac{n_n}{n_n + \sum_1^n \Delta n_j} = \frac{n_{ро}}{n_{ро} + \Delta n_{л} + \Delta n_{эн.} + \Delta n_{д} + \Delta n_{мп}}$$

Оценка эффективности потребления силового канала требует учета мощности, связанной с сечением 0, и потерь мощности всех элементов силового канала:

$$h_{с.потр} = \frac{n_0}{n_0 + \sum_1^n \Delta n_j} = \frac{n_{л,потр}}{n_{л,потр} + \Delta n_{л} + \Delta n_{эн.} + \Delta n_{д} + \Delta n_{мп}} \tag{5}$$

Обобщенный критерий энергетической эффективности обеспечивает единообразие оценок в нетри-

виальных случаях и сводится к общепринятому показателю – КПД в тривиальных. Он основан на строгом соблюдении понятия «полезная работа», отнесен к конкретному сечению силового канала и к определенному временному интервалу, учитывает потери в заданном числе элементов силового канала.

Полезной является работа, совершаемая рабочим органом по отношению к технологическому объекту. Она связана с изменением его энергии и количественно определяется энергоемкостью целевого физического процесса взаимодействия рабочего органа и технологического объекта. Полезной является также работа как по сообщению технологическому объекту определенной энергии (например, при подъеме груза), так и по ее изъятию и рассеиванию (например, при опускании груза). Поэтому в выражении для обобщенного критерия используются абсолютные значения энергии или мощности, т. е. модули.

К полезной не относится работа, затрачиваемая на перемещение рабочего органа, если она не связана с изменением энергии технологического объекта.

Обобщенный критерий позволяет решать задачи оценки ряда энергетических процессов, в том числе тех, которые для традиционных показателей оказались непосильными:

- процесса преобразования энергии электропривода со сложным силовым каналом – путем установления равнозначности разнонаправленных энергетических потоков и строгих правил определения понятия «полезная работа»;

- процесса потребления энергии во всех режимах, включая режимы стопорения, частичного или полного накопления энергии, – путем замены ограниченного и неэффективного коэффициента мощности $\cos \varphi$ универсальным показателем, способным охарактеризовать эффективностью потребления энергии электроприводы любого типа.

При этом важно подчеркнуть, что все показатели эффективности имеют единообразные форму описания и физический смысл (для сравнения: у традиционных КПД и $\cos \varphi$ совершенно разные определительные соотношения и разный физический смысл).

Вместе с тем знакомство и понимание метода обобщенного критерия [2] затруднено сложностью исходного математического описания, самой формой обобщения, содержащей множество признаков (характер процесса, связи с временными его параметрами, с определенными сечениями силового канала), логической последовательностью изложения – от сложного к простому.

Учитывая это, во второй части статьи рассмотрим вариант формирования показателей энергетической эффективности в более простой форме и в логической последовательности от простого и известного к сложному и новому, основанный на функциональных свойствах типовых элементов силового канала.

Знакомство с ним начинается не со сложной обобщенной формы, воспринимаемой как абстрактная математическая конструкция, а со знакомых элементов и их свойств. При этом принят наиболее простой и распространенный, т. е. традиционный, тип электропривода – с простым силовым каналом, не содержащим каких-либо преобразовательных устройств.

Обратимся к элементам силового канала и попытаемся выяснить, какую оценочную информацию можно получить на этом уровне. Независимо от физической природы элемента, вида связанной с ним энергии и других признаков каждый элемент силового канала является прежде всего потребителем электрической или другой энергии. Это свойство является обязательным и всеобщим. Второе свойство – индивидуальное и связано с функциональным назначением элемента.

Одни элементы выполняют функцию преобразования одного вида энергии в другой, например электромеханическое преобразование электродвигателем, другие преобразуют форму одного и того же вида энергии, третьи выполняют функцию ее передачи, четвертые являются накопителями энергии. Любая из названных функций должна иметь критерий для оценки эффективности ее выполнения.

Каждый элемент силового канала имеет один входной сигнал – потребляемой мощности $n_{\text{потр}}$ и два выходных сигнала – преобразованной (переданной) мощности $n_{\text{пр.(пер)}}$ и мощности потерь Δn (см. рис. 1, б). Для отдельно взятого элемента силового канала возможны только два оценочных отношения:

- отношение мощности потерь Δn к преобразованной (переданной) $n_{\text{пр.(пер)}}$ мощности

$$\frac{\Delta n}{n_{\text{пр.(пер)}}}; \quad (6)$$

- отношение мощности потерь Δn к потребленной мощности $n_{\text{потр}}$

$$\frac{\Delta n}{n_{\text{потр}}}. \quad (7)$$

Используя общепринятую структуру КПД на основе оценочных соотношений (6) и (7), можно получить следующие показатели эффективности преобразования $h_{\text{пр}}$ и потребления $n_{\text{потр}}$ отдельно взятого элемента:

$$h_{\text{пр.(пер)}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta n}{n_{\text{пр.(пер)}}}} = \frac{n_{\text{пр.(пер)}}}{n_{\text{пр.(пер)}} + \Delta n}; \quad (8)$$

$$h_{\text{потр}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta n}{n_{\text{потр}}}} = \frac{n_{\text{потр}}}{n_{\text{потр}} + \Delta n}. \quad (9)$$

Например, для двигателя (см. рис. 1, в) показатели (8) и (9) имеют вид:

$$h_{\text{д.пр}} = \frac{n_{\text{д.пр}}}{n_{\text{д.пр}} + \Delta n_{\text{д}}}; \quad (10)$$

$$h_{д.потр} = \frac{n_{д.потр}}{n_{д.потр} + \Delta n_{д}};$$

для передающей линии (см. рис. 1,з):

$$h_{л.пер} = \frac{n_{л.пер}}{n_{л.пер} + \Delta n_{л}}. \quad (11)$$

$$h_{л.потр} = \frac{n_{л.потр}}{n_{л.потр} + \Delta n_{л}}.$$

Коэффициент полезного действия системы последовательно соединенных элементов равен произведению их КПД. Следовательно, для передачи–преобразования системы «линия–электродвигатель» можно записать:

$$h_{с.л.д} = h_{л.пер} \cdot h_{д.пр} = \frac{n_{л.пер}}{n_{л.пер} + \Delta n_{л}} \cdot \frac{n_{д.пр}}{n_{д.пр} + \Delta n_{д}}.$$

Учитывая равенство $n_{л.пер} = n_{д.пр} + \Delta n_{л}$, имеем

$$h_{с.л.д} = \frac{n_{д.пр}}{n_{л.пер} + \Delta n_{л}} = \frac{n_{д.пр}}{n_{д.пр} + \Delta n_{л} + \Delta n_{л}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta n_{л} + \Delta n_{д}}{\Delta n_{д.пр}}}.$$

Сравнивая (10) с (3), (11) с (4), нетрудно убедиться в их полном совпадении. Следовательно, элементной первоосновой обобщенного критерия энергетической эффективности [2], как и предложенного варианта, являются оценочные отношения $\frac{\Delta n}{n}$ и $\frac{\Delta n}{n_{потр}}$. Поэтому все последующие положения данного варианта расчета показателей эффективности могут быть отнесены и к обобщенному критерию.

Для определения показателя эффективности элемента, группы элементов или силового канала в целом на диаграмме силового канала граничными сечениями слева и справа выделяется область, соответствующая данному объекту.

При вычислении показателя передачи–преобразования учитывается мощность, соответствующая сечению, совпадающему с правой границей выделенной области; при определении показателя потребления – мощность сечения, соответствующего левой границе выделенной области. В обоих случаях принимаются во внимание мощности потерь элементов, находящихся внутри выделенной области. Например, при оценке энергетической эффективности силового канала в целом (см. рис. 1,а) выделяется область, ограниченная крайними сечениями: справа – сечением n (рабочий орган с мощностью n_n), слева – сечением 0 (источник питания с мощностью n_0).

При определении показателя передачи–преобразования силового канала используется мощность n_n , соответствующая сечению n , при определении показателя потребления учитывается мощность n_0 , соответствующая сечению 0. В обоих случаях учитывается мощность потерь элементов, расположенных внутри области:

$$h_{с.пер.пр} = \frac{n_n}{n_n + \sum_1^n \Delta n_j} = \frac{n_n}{n_{ро} + \Delta n_{л} + \Delta n_{эп} + \Delta n_{д} + \Delta n_{мп}};$$

$$h_{с.потр} = \frac{n_0}{n_0 + \sum_1^n \Delta n_j} = \frac{n_n}{n_0 + \Delta n_{л} + \Delta n_{эп} + \Delta n_{д} + \Delta n_{мп}}.$$

Если известны показатели эффективности преобразования элементов силового канала, то показатель системы (см. рис. 1,а) можно определить по формуле

$$h_{с.пер.пр} = h_{л.пер} \cdot h_{эп.пр} \cdot h_{д.пр} \cdot h_{мп.пр}. \quad (12)$$

Формула (12) в общем виде при произвольном числе элементов n силового канала имеет вид

$$h_{с.пер.пр} = \prod_{i=1}^{i=n} h_{i.пер.пр}.$$

Небезынтересно сравнить традиционный показатель потребления $\cos \varphi$ с предложенным $h_{д.потр}$, определив отношение $\frac{h_{д.потр}}{\cos \varphi}$. Сравниваемые показатели

описываются зависимостями

$$h_{потр} = \frac{n_{потр}}{n_{потр} + \Delta n}; \quad \cos \varphi = \frac{n_{потр}}{n_{полн}}.$$

Их отношение:

$$\frac{h_{потр}}{\cos \varphi} = \frac{n_{потр} \cdot n_{полн}}{(n_{потр} + \Delta n) \cdot n_{потр}} = \frac{n_{полн}}{n_{потр} + \Delta n}.$$

Расчеты показывают, что полная мощность $n_{полн}$ асинхронного двигателя всегда больше суммы потребляемой мощности и мощности потерь. Следовательно,

$$\frac{h_{потр}}{\cos \varphi} > 1.$$

О том же свидетельствуют графики зависимостей сравниваемых показателей от моментов нагрузки $h_{потр}(m)$, $\cos \varphi(m)$, построенные на рис. 2 для электродвигателя 4А180М4 [1]. Характеристика $h_{потр}(m)$ выше характеристики $\cos \varphi(m)$ во всем диапазоне нагрузок. Они весьма близки в интервале нагрузок от 0,8 до 1,0, но расходятся по мере снижения нагрузки, тем сильнее, чем значительнее ее падение. Так, при $m = 0,5$ $\cos \varphi$ составляет 0,95 от величины $h_{потр}(m)$, при $m = 0,25$ уже 0,78, а при свободном ходе – 0,33.

Сравнение величин $h_{потр}(m)$ и $\cos \varphi(m)$ свидетельствует, что показатель $h_{потр}(m)$ более оптимистично характеризует процесс потребления энергии, чем $\cos \varphi(m)$, особенно при низких нагрузках.

Определим теперь соотношения показателей эффективности преобразования $n_{пр}$ и потребления $n_{потр}$ с традиционными показателями КПД и $\cos \varphi$ для типовых элементов силового канала, отдельных групп элементов и для силового канала в целом.

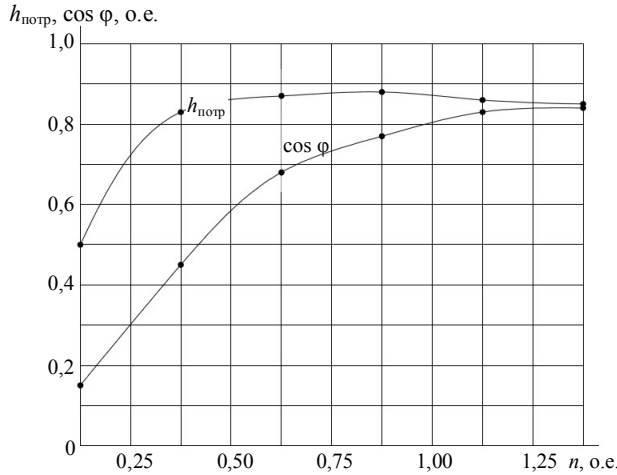


Рис. 2. Сравнение обобщенного показателя потребления $h_{\text{потр}}$ с $\cos \varphi$

С этой целью оценочные отношения показателей передачи–преобразования $\Delta n/n_{\text{пр(пер)}}$ и потребления $\Delta n/n_{\text{потр}}$ элементов преобразуем с помощью известных зависимостей, содержащих показатель η :

$$\Delta n_i = n_{i,\text{пер.пр}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right), \quad \Delta n_{i,\text{потр}} = \frac{n_{i,\text{пр}}}{\eta_i}.$$

Тогда

$$\frac{\Delta n_i}{n_{i,\text{пер.пр}}} = \frac{1}{\eta_i} - 1, \quad (13) \quad \frac{\Delta n_i}{n_{i,\text{потр}}} = 1 - \eta_i. \quad (14)$$

Подставив (13) и (14) в (8) и (9), получим

$$h_{i,\text{пер.пр}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\eta_i} - 1} = \eta_i, \quad h_{i,\text{потр}} = \frac{1}{2 - \eta_i}.$$

Как видим, показатель передачи–преобразования $h_{i,\text{пер.пр}}$ совпадает с традиционным КПД, что закономерно, так как рассматривается традиционный случай неусложненного силового канала. Показатель потребления $h_{i,\text{потр}}$ также связан с традиционным КПД, а связь его с $\cos \varphi$, который традиционно служит показателем потребления, отсутствует.

Для силового канала (см. рис. 1,а), если не учитывать потери рабочего органа ввиду их малости, можно записать:

$$h_{i,\text{пер.пр}} = h_{i,\text{л.пер}} \cdot h_{\text{эл.пр}} \cdot h_{\text{д.пр}} \cdot h_{\text{мп}},$$

а с учетом равенства $h_{i,\text{пер.пр}} = \eta_i$:

$$h_{\text{с.пер.пр}} = h_{\text{л}} \cdot h_{\text{эл}} \cdot h_{\text{д}} \cdot h_{\text{мп}}. \quad (15)$$

Показатель эффективности передачи–преобразования электропривода в общем виде можно представить как

$$h_{\text{с.пер.пр}}^{1-n} = \prod_{j=1}^{j=n} \eta_j.$$

Согласно зависимости (5) показатель эффективности потребления для электропривода (см. рис. 1,а)

при цифровом обозначении элементов силового канала имеет вид

$$h_{\text{с.потр}}^{1-4} = \frac{n_0}{n_0 + \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \Delta n_4}.$$

Суммарные потери электропривода

$$\sum_1^4 \Delta n = \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \Delta n_4$$

или

$$\sum_1^4 \Delta n = n_1 \cdot \left(\frac{1}{\eta_1} - 1 \right) + n_2 \cdot \left(\frac{1}{\eta_2} - 1 \right) + n_3 \cdot \left(\frac{1}{\eta_3} - 1 \right) + n_4 \cdot \left(\frac{1}{\eta_4} - 1 \right).$$

Если учесть соотношения $n_1 = n_0 \cdot \eta_1$; $n_2 = n_0 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$; $n_3 = n_0 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$; $n_4 = n_0 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$; получим

$$\sum_1^4 \Delta n = n_0 \cdot [(1 - \eta_1) + \eta_1 \cdot (1 - \eta_2) + \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot (1 - \eta_3) + \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot (1 - \eta_4)].$$

После элементарных математических операций будем иметь

$$\sum_1^4 \Delta n = n_0 \cdot [1 - \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4].$$

Показатель эффективности потребления запишется следующим образом:

$$h_{\text{с.потр}}^{1-4} = \frac{n_0}{n_0 + n_0 \cdot (1 - \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4)} = \frac{1}{1 + (1 - \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4)} = \frac{1}{2 - \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4}.$$

Учитывая (15), в окончательном виде будем иметь

$$h_{\text{с.потр}}^{1-4} = \frac{1}{2 - h_{\text{с.пер.пр}}^{1-4}} = \frac{1}{2 - \prod_{j=1}^{j=n} \eta_j}.$$

При расчете показателей эффективности системы необходимо располагать значениями мощности и величинами потерь при различных нагрузках электропривода всех элементов системы. Для этого достаточно знать мощность n_i одного элемента, например электродвигателя, и зависимость $\eta_i(m)$ и $\eta_i(n)$ всех остальных элементов.

Для определения мощности потерь можно идти другим путем. По номинальному току двигателя выбирают тип кабеля, определяют сечение его токоведущих жил и с учетом длины линии L_{Σ} – суммарное сопротивление линии R_{Σ} . Так как мощность потерь в активных сопротивлениях источника, линии и приемника определяется полным током, то при заданной активной мощности эти потери будут:

$$\Delta N_{\Sigma} = I^2 \cdot R_{\Sigma} = \left(\frac{N_a}{U} \right) \cdot R_{\Sigma} \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

или, в относительных единицах,

$$\Delta n_{\Sigma} = \frac{\Delta N_{\Sigma}}{N_{\text{н}}} = \left(\frac{N_a}{U} \right)^2 \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{N_{\text{н}} \Sigma}, \quad (16)$$

где $N_{\text{н}}$ – номинальная мощность электродвигателя, Вт.

Трудность использования (16) на практике заключается в том, что разработчикам электропривода далеко не всегда известна длина линии L_n , а следовательно, и ее сопротивление R_c .

При отсутствии данных о параметрах линии, если возникла необходимость сравнительной оценки различных ее вариантов, можно воспользоваться условной длиной, равной, например, 1 км. А переход от потерь условной линии к потерям реальной трудностей не вызывает [4].

ВЫВОДЫ

1. Как показано на примере электропривода с простым силовым каналом (традиционный случай), обобщенный критерий эффективности, несмотря на сложные формы, базируется на простых и привычных понятиях и положениях.

2. В отличие от традиционных показателей КПД и $\cos \varphi$, обобщенные показатели характеризуются единообразием формы, физического смысла, определяемых отношений.

3. Строгим соблюдением сформулированных понятий «полезная работа», «неотрицательные потоки

энергии» и «метод обобщенного критерия» решают проблему объективной оценки эффективности электроприводов со сложными энергетическими процессами.

4. Авторская версия формирования показателей энергетической эффективности, основанная на функциональных свойствах типовых элементов силового канала, имеющая иной порядок формирования показателей эффективности, обуславливает простоту и наглядность, т. е. благоприятные условия для усвоения.

5. Показатели эффективности, полученные согласно предложенной версии, точно совпадают с показателями обобщенного критерия [1]. Следовательно, все выводы и положения данной версии в равной степени относятся к обоим методам расчета. Вторая версия показателей представлена в развернутой форме, но может преобразовываться в обобщенную.

6. Получены важные для практических расчетов новые показатели эффективности соотношений, с помощью которых можно определить последние по каталожным данным электродвигателя и других элементов силового канала электропривода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Асинхронные двигатели серии 4А [Текст] : справочник / А. Э. Кравчек, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
- [2] Ильинский, Н. Ф. Критерий эффективности электромеханического преобразования энергии [Текст] / Н. Ф. Ильинский, А. О. Горнов // Электричество. – 1987. – № 10. – С. 24–29.
- [3] Ильинский, Н. Ф. Энергосберегающая технология энергоснабжения народного хозяйства [Текст] : практ. пособие : в 5 кн. / Н. Ф. Ильинский ; под ред. В. А. Веникова. Кн. 2 : Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский, Ю. В. Рожанковский, А. О. Горнов. – М. : Высшая школа, 1989. – 127 с.
- [4] Китаенко, Г. И. Справочник судового электромеханика [Текст] / Г. И. Китаенко. – Л. : Судостроение, 1980. – Т. 1: Судовые электроэнергетические системы и устройства. – 528 с.
- [5] Локарев, В. И. Энергосбережение в электроприводе [Текст] : учеб. пособие / В. И. Локарев. – Николаев : НУК, 2009. – 196 с.

© В. И. Локарев

Надійшла до редколегії 10.09.2014

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. А. А. Ставинський