

Энергоэффективность эксплуатации технических систем

Energy efficiency exploitation of technical systems

L.E. Švarcberg

Зав. каф. «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности», проф., д.т.н.
Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования
Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН»
(ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»)
127055 Москва, Вадковский пер. 3а, Россия, e-mail: lesh@stankin.ru

Ключевые слова: технические системы, эксплуатация, энергоэффективность, коэффициент мощности, компенсация

Резюме

В работе показано, что низкая энергоэффективность эксплуатации технических систем в значительной степени определяет их негативное воздействие на окружающую среду и человека. На основе уравнения энергетического баланса показано, что снижение энергоэффективности связано с потерей энергии при ее преобразовании и передаче и со снижением коэффициента мощности электро-технических устройств технических систем.

Снижение коэффициента мощности обусловлена тем, что при эксплуатации технических систем значение потребляемой мощности на валу приводного двигателя этих систем существенно меньше ее номинального значения. Потери энергии и снижение коэффициента мощности приводят к загрязнению окружающей среды и снижению безопасности человека при эксплуатации технических систем. Наиболее эффективным способом повышения энергоэффективности эксплуатации является повышение коэффициента мощности посредством компенсации сдвига фаз, что снижает величину потребляемого тока за счет компенсации ее реактивной составляющей.

Экспериментальные исследования на примере станочных технических систем показали, что применение метода компенсации сдвига фаз позволяет существенно повысить энергоэффективность эксплуатации этих систем. При этом существенно уменьшается величина потребляемой мощности, величина ее реактивной составляющей и величина потребляемого тока и существенно увеличивается коэффициент мощности технических систем при их эксплуатации.

Key words: technical systems, exploitation, energy efficiency, power factor, compensation

Abstract

The paper shows that the low energy efficiency exploitation of technical systems to a large extent determines their negative impact on the environment and humans. On the basis of the energy balance equation shows that the decrease in efficiency due to the loss of energy during its conversion and the transmission and power factor with reduced electrical devices technical systems.

Reduced power factor due to the fact that the technical system operation the power consumption of the drive motor on the shaft of these systems much less than its nominal value. Loss of energy and reducing power factor leads to contamination of the environment and reduction of human security in the operation of technical systems. The most effective way to improve the energy efficiency of operation is to improve the power factor by compensating the phase shift, which reduces the current consumption due to compensation of the reactive component of it.

Experimental research in machine tool technology systems have shown that the application of the method of compensation of phase shift can significantly improve the energy efficiency of the operation of these systems. This significantly reduces the amount of power consumption, the value of its reactive component and the input current and greatly increasing the power factor of technical systems in their operation.

Содержание

Обеспечение энергоэффективности эксплуатации технических систем является одним из наиболее важных направлений деятельности во многих странах мира в целом и в России в частности. При этом, на современном этапе повышение энергоэффективности является задачей не только экономической, но и задачей, что не менее важно, обеспечения безопасности жизнедеятельности человека. Объясняется это тем, что снижение потребления энергии при эксплуатации технических систем обусловлено как с уменьшением ее потерь, а значит и загрязнения окружающей среды, так и с более рациональным ее использованием. При этом большое внимание уделяется вопросам снижения потребления, в первую очередь, электрической энергии, как одного из наиболее распространенных видов энергии, обеспечивающих функционирование технических систем. Непосредственным потребителем электрической энергии в этих системах являются их электротехнические системы, в первую очередь электрический двигатель, на основе которого часто построены приводные механизмы судовых систем, станочных систем, транспортных систем и др. Следует отметить, что во многих отраслях промышленности – судостроительной, авиастроительной, станкостроительной и др., технические системы формируют технологическую среду, которая в значительной мере определяет конкурентоспособность отрасли. Технологическая среда – это в первую очередь станочные технические системы для изготовления изделий для отрасли и машиностроительные технологии формообразования, реализуемые на этом оборудовании.

Машиностроительные технологии формообразования имеют ряд особенностей, отличающие их от других областей хозяйственной деятельности человека (рис. 1).



Рис. 1. Особенности машиностроительных технологий формообразования

Во-первых, это многообразие видов и типов технологий и многообразие оборудования, на которых они реализуются – технологии обработки резанием (точение, шлифование, фрезерования и др.), давлением, литьем, электротехнические методы обработки; токарные, фрезерные, шлифовальные, электроэрозионные станки, кузнечно-прессовое и литейное оборудование и многие другие станки и оборудование для реализации технологий формообразования.

Во-вторых, это, как правило, сверхширокий диапазон изменения параметров технологических процессов. Это относится, например, к скоростям резания, к скоростям подачи, к глубине резания и др. Так, диапазон регулирования скоростей подачи должен достигать величин 10 000 (и даже 100 000):1.

Третьей особенностью машиностроительных технологий формообразования является то, что они должны реализовываться на всем диапазоне изменения параметров с высокой точностью. Погрешность изготовления деталей часто должна достигать микронных и даже долемикронных величин.

Необходимо также отметить, что эта высокая точность должна обеспечиваться не только в условиях сверхширокого диапазона изменения параметров технологических процессов, но и в условиях проявления существенных статических и динамических возмущений при их реализации, характерных для производственных условий. Возникновение этих возмущений обусловлено тем, что производственная среда, в которой реализуются машиностроительные технологии формообразования, как правило, не обеспечена защитой от изменений температуры, влажности, вибраций и других факторов. Кроме того, возмущения возникают и из-за колебаний припуска, затупления инструмента, загрязнения масел, износа подвижных элементов и т.п. Особенно сильно эти причины проявляются на низких и инфранизких скоростях, на которых инерционность систем практически не проявляется. Наличие этих возмущений обуславливает четвертую особенность машиностроительных технологий формообразования.

Обеспечение единства подхода к анализу энергоэффективности эксплуатации технических систем при вышеперечисленных особенностях машиностроительных технологиях формообразования возможно посредством энергетического анализа[1].

При этом анализе техническую систему можно представить как систему преобразования и передачи энергии [2]. Системой преобразова-

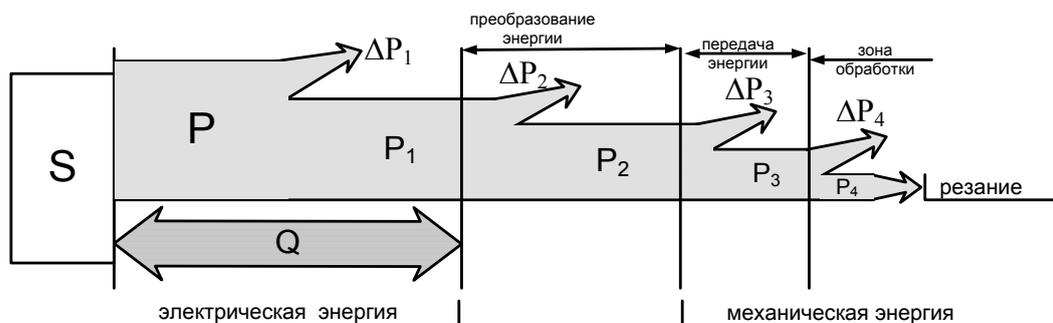


Рис. 2. Энергетический анализ; P_4 – мощность резания, ΔP_4 – потери в зоне резания, ΔP_3 – потери при передаче механической энергии, ΔP_2 – потери при преобразовании электрической энергии в механическую, ΔP_1 – потери при передаче электрической энергии к электродвигателю станка, P, P_1, P_2, P_3 – активная составляющая потребляемой мощности соответственно при передаче и преобразовании энергии, Q – реактивная составляющая потребляемой мощности, S – потребляемая мощность

ния энергии в случае станочной системы является электродвигатель, который преобразует электрическую энергию в механическую, а системой передачи механической энергии – кинематика станка.

Как и во всякой системе, преобразование и передача энергии происходит с потерями. С одной стороны величины потерь определяют КПД станка, а с другой стороны – характеризуют различные виды отходов (тепловые, вибрационные, шумовые и т.п.), т.е. определяют показатели безопасности и качества технологического процесса.

Сущность энергетического анализа поясняет рисунок 2 (на примере станочных технических систем).

Энергетический анализ позволяет сформировать энергетический баланс технической системы при ее эксплуатации, который связывает потребляемую мощность, мощность, необходимую для выполнения целевой функции (для станочных технических систем – это мощность резания) и коэффициент мощности.

Аналитическое выражение энергетического баланса в соответствии с рисунке 2 и может быть представлено в виде:

$$S = \frac{P_4 + \sum_{i=1}^4 \Delta P_i}{\cos \varphi}$$

где $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Как следует из энергетического баланса передача и преобразование энергии как с электрической, так и с механической стороны технической системы сопровождается потерями мощность ΔP_i на каждом i -ом этапе преобразования и передачи. Именно эти потери в значительной степени определяют экономические (через КПД) показатели качества технических систем, но и, что не менее важно, показатели

безопасности этих систем при их эксплуатации. Действительно, именно потери энергии при передаче в зону обработки формируют электромагнитные отходы – преобразование электрической энергии в электромагнитную; тепловые отходы – преобразование механической энергии в тепловую; химические загрязнения – преобразование механической энергии в химическую (через тепловые преобразования); шумовые и вибрационные отходы – преобразования механической энергии в звуковую и нецелевую механическую и т.п. Все это приводит к загрязнению окружающей среды, возникновению опасных и вредных факторов при эксплуатации технических систем, к загрязнению атмосферы, гидросферы и литосферы твердыми, жидкими, газообразными и энергетическими отходами (рис. 3).

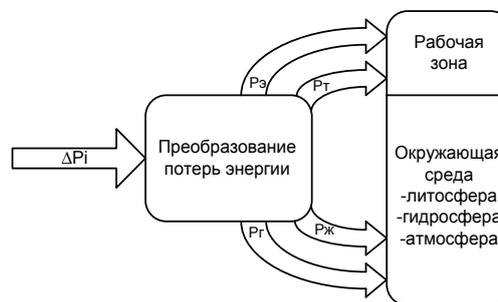


Рис. 3. Формирование опасностей производственной среды; $P_э$ – энергетические отходы; $P_т$ – твердые отходы; $P_ж$ – жидкие отходы; $P_г$ – газообразные отходы

В следствие этого ухудшаются условия жизни и труда, их комфортность, возникают нарушения здоровья населения, увеличиваются профессиональные заболевания работников.

В этой связи обеспечение безопасности эксплуатации технических систем непосредственно связано с реализацией целевой функции:

$$C = \Delta P_i \rightarrow \min$$

Эта целевая функция реализуется специалистом по безопасности или инженером-экологом в тесном контакте со специалистами других профилей (конструктором, технологом, специалистом по автоматизации и др. специалистами). Именно содружество специалистов разных профилей в обеспечении безопасности технических систем позволяет реализовать основной принцип обеспечения безопасности – устранить опасности для человека и окружающей среды непосредственно в источнике возникновения этих опасностей. Обеспечивается это через безопасно-ориентированное конструирование, технологии, средства автоматизации.

Учитывая особенности технических систем, изложенные выше, важнейшим направлением обеспечения безопасности этих систем, реализации целевой функции, является автоматизация обеспечения показателей безопасности, обеспечивающая минимизацию как отдельного вида отходов, так и их совокупности, т.е. минимизацию

$$\sum_{i=1}^4 \Delta P_i.$$

Однако величина потребляемой при эксплуатации технических систем энергии характеризуется не активной, а полной мощностью S , в большинстве случаев существенно превышающей ее активную составляющую P . Это объясняется тем, что электротехническая система представляет собой, как правило, RL нагрузку и величина потребляемой мощности для этого типа нагрузки определяется не только ее активной составляющей, но и коэффициентом мощности.

Для повышения энергоэффективности, как следует из выражения энергетического баланса, необходимо уменьшать потери энергии при ее преобразовании и передаче, снижать мощность, необходимую для выполнения полезной работы (в нашем примере – мощность резания) и повышать коэффициент мощности.

Повышение энергоэффективности имеет важнейшее значение с точки зрения уменьшения воздействия этих систем на окружающую среду и человека, так как низкая энергоэффективность приводит к неэффективному использованию источников электрической энергии и к существенному загрязнению окружающей среды отходами.

Следует также отметить, что с физической точки зрения повышения энергоэффективности означает эксплуатацию технических систем при меньших потребляемых токах, что существенно

облегчает работу силовых электрических цепей и снижает величину потерь ΔP_1 .

С точки зрения повышения энергоэффективности эксплуатации технических систем наибольшее значение имеет повышение коэффициента мощности. Низкое же значение коэффициента мощности объясняется спецификой реализации технических систем – их реализация осуществляется при мощностях, приведенных к валу электродвигателя, существенно меньших их номинальных значений. В станочных системах это обстоятельство дополнительно усугубляется и обязательным наличием в цикле обработки изделия холостых ходов, необходимых для подвода и отвода инструмента, его сменой и т.п. В реальных технических системах при снижении нагрузки на валу двигателя от номинального значения до значения холостого хода, значение коэффициента мощности уменьшается в 3–4 раза.

Таким образом, повышение энергоэффективности эксплуатации технических систем может быть обеспечено уменьшением потерь энергии при ее передаче и преобразовании и повышением коэффициента мощности этих систем при их эксплуатации и имеет большое, если не решающее, значение с точки зрения обеспечения защиты окружающей среды, улучшения экологических показателей качества эксплуатации технических систем, создание комфортных условий труда работников.

Рассмотрим возможности повышения энергоэффективности эксплуатации технических систем на примере реализации машиностроительных технологических процессов формования станочных систем.

Исследования проводились при различных видах технологических процессов, при разных параметрах этих процессов и при их реализации на различных типах оборудования. При исследованиях осуществлялось повышение коэффициента мощности посредством компенсации сдвига фаз, что физически означает компенсацию (автоматическую) реактивной составляющей потребляемого тока при реализации технологического процесса. Для этих целей была создана специальная установка компенсации, позволяющая не только осуществлять компенсацию но и выводить на дисплей значения потребляемой мощности, ее активной и реактивной составляющих, потребляемого тока и коэффициента мощности. Исследования проводились как в лабораторных, так и в производственных условиях.

При исследованиях реализация технологического процесса формообразования осуществлялась в автоматическом режиме при заданных параметрах технологического процесса (частота вращения инструмента или заготовки, скорость подачи инструмента или заготовки, глубина резания) и при заданных параметрах инструмента (углы заточки, материал), и условий формообразования (с наличием или без смазочно-охлаждающей жидкостей).

Компенсационная установка подключалась непосредственно к станку и в ходе реализации технологического процесса автоматически переходила в режим «без компенсации сдвига фаз» (без комп.) и в режим «с компенсацией сдвига фаз» (с комп.).

В компенсационной установке предусмотрен датчик тока, а также система, обеспечивающая задание минимального тока, необходимого для реализации технологического процесса, и система сравнения реального тока с минимальным. При наличии превышении реального тока заданного минимального значения срабатывают коммутационные устройства, обеспечивающие снижение реального тока до минимального заданного значения.

При реализации установки была решена задача максимального ее приближения к потребителю, что позволило легко адаптировать установку к станкам и обеспечить максимальную компенсацию реактивной составляющей потребляемой мощности. Следует также добавить, что автоматическая компенсация реактивной составляющей потребляемой мощности осуществляется за время полного цикла изготовления детали.

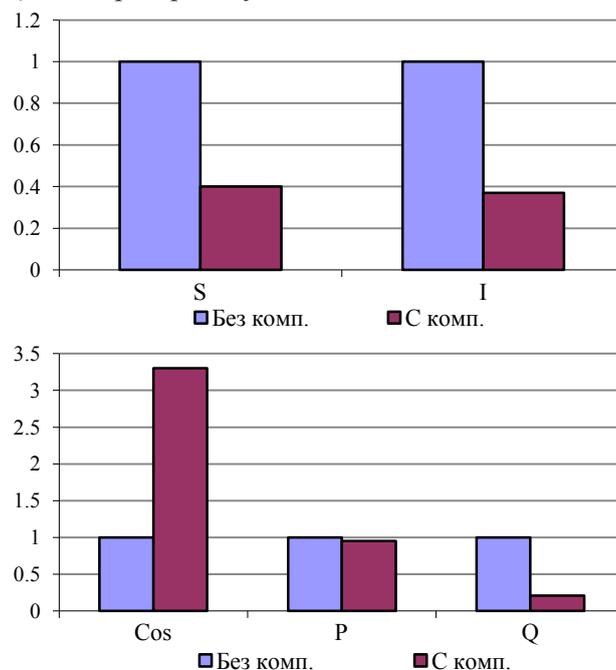
Следует также добавить что установка имеет достаточно малую массу, обладает высокой мобильностью и проста в эксплуатации. Кроме того потери активной составляющей потребляемой мощности при компенсации не превышают 0,3–0,45 кВт на 100 кВАр.

Установка позволяет:

- компенсировать реактивную составляющую потребляемой мощности в соответствии с нагрузочными характеристиками технологического процесса;
- управлять процессом компенсации в автоматическом режиме;
- адаптировать процесс компенсации к конкретному технологическому процессу.

Результаты экспериментальных исследований энергоэффективности представлены на рисунке 4.

а) в лабораторных условиях



б) производственных условиях

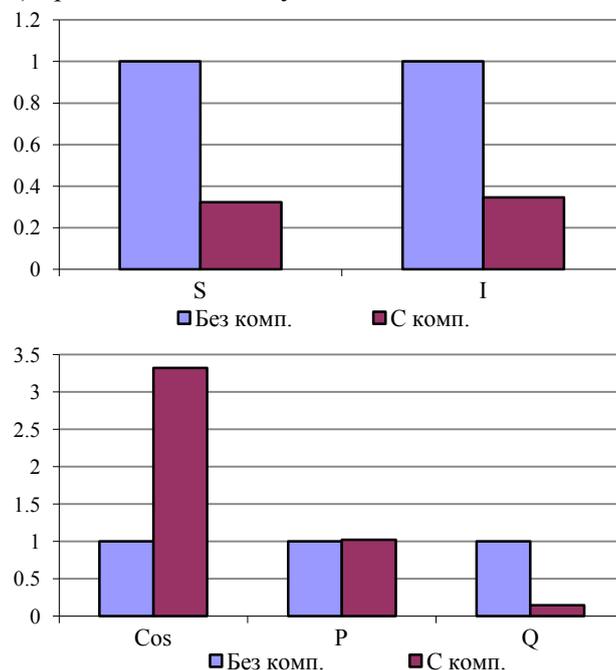


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований энергоэффективности

На рисунке показаны результаты экспериментальных исследований при реализации технологического процесса фрезерование (в лабораторных условиях) и технологического процесса сверления (в производственных условиях). Как показали результаты экспериментальных исследований величина потребляемой мощности при включении установки уменьшается в 2,5–3 раза. В такое же количество раз повышается энергоэффективность эксплуатации

технических систем. При этом величина потребляемого тока снижается в 2,7–2,9 раз, что повышает безопасность эксплуатации технической системы. Кроме того, применение компенсационной установки повышает коэффициент мощности в 3,3 раза, снижает реактивную составляющую потребляемой мощности в 5–6,6 раза. Именно за счет этого снижения и снижается общее потребление энергии, т.к. активная составляющая потребляемой мощности практически не изменяется, т.к. ее величина определяется мощностью целевой функции (незначительные ее изменения обусловлены собственным потреблением установки, неоднородностью структуры материала заготовки и др. возмущающими факторами).

На рисунке результаты экспериментальных исследований представлены в относительных единицах. Исследования, проводимые для других видов технологических процессов, при других их параметрах, материалах изделий и параметров инструмента, показали аналогичные результаты.

Также были проведены экспериментальные исследования эффективности установки при реализации технологических процессов с применением и без применения смазочно-охлаждающих жидкостей при реализации машиностроительных технологических процессов формообразования. Результаты этих исследований показали, что применение смазочно-охлаждающих жидкостей незначительно снижает величину потребляемой мощности за счет снижения ее активной составляющей. Это снижение активной составляющей обусловлено снижением сил резания, определяемое улучшением смазочных свойств (снижением трения) в зоне резания при применении смазочно-охлаждающих жидкостей. Однако, в этом случае, реальная мощность на валу двигателя падает, хотя и незначительно. Это падение приводит к тому, что коэффициент мощности двигателя снижается и за счет этого несколько увеличивается реактивная составляющая потребляемой мощности. Последнее рассуждение позволяет обосновать следующее положение.

Отождествление энергоемкости машиностроительных технологических процессов формообразования с их энергоэффективностью недостаточно правомерно. Действительно, инженер-технолог, разрабатывая технологический процесс подбором параметров этого процесса, режущего инструмента и его геометрии, оборудования на котором реализуется технологический процесс, обеспечивает минимальную

мощность, которая необходима для реализации этого процесса, т.е. его энергоемкость. Однако при практической реализации разработанного технологического процесса при заданной его энергоемкости, потребляемое количество энергии превышает рассчитанную технологом величину. Это превышение может составлять сотни процентов. Таким образом, в реальных условиях реализация технологического процесса с заданной энергоемкостью осуществляется неэффективно, т.е. с низкой энергоэффективностью.

По этой причине, можно предположить, что энергоэффективность технологического процесса следует определять как отношение мощности, необходимой для реализации технологического процесса, рассчитанной технологом, к реальной потребляемой при реализации этого процесса мощности.

Заключение

На основе представленного материала, проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным методом повышения энергоэффективности эксплуатации технических систем является метод компенсации сдвига фаз, позволяющий компенсировать реактивную составляющую потребляемого тока за счет повышения коэффициента мощности электротехнических систем станка, в первую очередь его электродвигателя. При этом величина потребляемой мощности при выполнении той же целевой функции снижается не менее чем в 2,5 раза, а значит и в такое же число раз повышается энергоэффективность процесса.

Повышение энергоэффективности эксплуатации технических систем позволяет снизить негативные воздействия этих систем на окружающую среду за счет более рационального использования электроэнергии и обеспечить безопасность персонала за счет эксплуатации технических систем с меньшими значениями потребляемого тока.

Литература

1. ШВАРЦБУРГ Л.Э.: Энергетический анализ безопасности технологических процессов. Вестник, МГТУ “Станкин”, 2010, 4.
2. ШВАРЦБУРГ Л.Э.: Особенности защиты окружающей среды в производственных условиях. Безопасность жизнедеятельности, 2006, 6.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России.