

Александр Клевцов

## Системы нечёткого управления уровнем потребления электроэнергии в промышленном оборудовании

### Состояние и актуальность вопроса

В ближайшем будущем электроэнергия станет самым дорогим ресурсом в России. Безусловно, на волне различных правительственных постановлений проводится колоссальная работа по созданию и внедрению целого спектра технологий рационального потребления электроэнергии в промышленном производстве и жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ). В русле складывающейся экономической ситуации акцент технико-экономических мероприятий сделан на реализацию масштабных энергосберегающих проектов, связанных в основном с глубоким совершенствованием системы учёта, большей частью на базе автоматизированных систем контроля и учёта электроэнергии (АСКУЭ), включая варианты с использованием беспроводных и облачных платформ. Вместе с тем современные производственные мощности располагают энергоёмким единичным оборудованием и комплексами, работающими под управлением специализированных встроенных систем, обеспечивающих выполнение технологических процессов и интегрированных в общую производственную среду с помощью соответствующих аппаратно-программных средств и коммуникаций.

Очевидно, что задача снижения потребления электроэнергии может решаться в рамках существующей АСУ ТП либо с помощью штатных возможностей установленного оборудования, если таковые имеются в системе (устройстве) управления конкретным агрегатом или технологическим комплексом. Результаты обследований различного оборудования только на ряде предприятий машиностроительного профиля показали, что около 60% энергоёмкого оборудования не располагает встроенными аппаратно-программными средствами для реализации режимов рационального потребления электроэнергии.

Как правило, этот перечень включает:

- 1) компрессорное оборудование;
- 2) смесительные устройства (экструдеры, миксеры и т.д.);
- 3) дозирующие комплексы;
- 4) котельное оборудование (нагнетатели, воздуходувки, насосы и т.д.);
- 5) транспортные стационарные системы (конвейеры, подъёмно-транспортное оборудование и т.д.);
- 6) насосные станции;

- 7) вентиляционное оборудование;
- 8) сепараторы жидких веществ и твёрдых фракций, центрифуги и т.д.;
- 9) мельницы, дробильные установки и т.д.;
- 10) специальное технологическое энергоёмкое оборудование (литейные машины, прессы, крупные расточные и протяжные станки);
- 11) электронагревательные системы и устройства.

В этом случае возможна модернизация существующей системы управления не только с целью повышения эксплуатационных характеристик оборудования, но и снижения потребления электроэнергии на основе внедрения программы оптимизации за счёт ресурсов вновь установленной аппаратно-программной платформы.

Если эксплуатируемая станция (система) управления имеет штатную интеллектуальную платформу с достаточными возможностями, то рассматривается возможность переноса функций оптимизации и рационального потребления электроэнергии в структуру управления конечным оборудованием. При этом должны соблюдаться два основных принципа:

- обеспечение совместимости встраиваемого программного модуля со структурой существующей управляющей программы;
- выполнение условий конвергенции, то есть сближения и сходимости циклов работы вносимого модуля со штатными приложениями локальной системы управления конкретной технологической установки или комплекса.

При наличии интеллектуальной платформы в системе управления не исключается вариант встраивания дополнительного контроллера с программой управления уровнем потребления, который интегрируется в систему за счёт реализации информационной связи с действующей платформой и за счёт соответствующей схемотехнической адаптации.

Следует отметить, что наибольшие возможности снижения потребления электроэнергии в приведённых видах энергоёмкого оборудования заключены в совершенствовании управления приводными системами по критерию минимизации потребления электроэнергии с помощью алгоритмов оптимизации на основе нечёткого управления.

## МОТИВАЦИИ К ПРИМЕНЕНИЮ НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Как известно, применение классических методов оптимизации [1] при реализации режимов рационального потребления электроэнергии влечёт за собой использование сложных математических моделей при синтезе звеньев системы автоматического управления. В качестве перспективной и эффективной альтернативы таким методам, а также прямому адаптивному управлению потреблением электроэнергии, предлагаются алгоритмы с использованием принципов нечёткого управления в технических системах (ТС).

Изначально идея применения нечёткой логики для анализа и управления в ТС принадлежит американскому математику и специалисту по управлению Л.А. Заде. В простейшем понимании нечёткое управление является логическим управлением, при котором характер и степень управляющего воздействия становятся результатом логического вывода. Основой построения нечётких управляющих систем служит теория нечётких множеств, которые в самой простой и единственной интерпретации, распространённой в ТС, представляются своей функцией принадлежности. Достаточно ёмко и подробно об основных смысловых установках, касающихся нечётких множеств, сказано в [2] и в ряде работ других зарубежных авторов.

Применительно к задаче оптимизации потребления электроэнергии (ЗОПЭ) число переменных параметров, характеризующих режимы работ силового электрооборудования технологических комплексов, довольно велико, и их значения во времени изменяются в зависимости от множества факторов, в том числе и от режимов работы: начальный запуск, резкое изменение нагрузки, торможение и т.д. В таких ситуациях стратегия управления проще и понятнее может быть выражена на языке некоего свода специальных производственных правил, нежели с помощью аналитического описания. Основными стимулами к использованию принципов нечёткого управления для решения ЗОПЭ следует считать:

- возможность решения ЗОПЭ с помощью дешёвых встраиваемых средств управления, собранных на базе широко применяемых микроконтроллеров с ограниченными аппаратными ресурсами;
- реализацию принципов нечёткого управления потреблением электроэнергии на фоне выполняемой технологической задачи при относительно несложной формализации предпосылок и следствий установленных правил с помощью нечётких множеств;
- малозатратные оценки качества управления и соответствующую оптимизацию параметров;
- возможность создания обучающихся, адаптивных, нечётких систем управления для согласования в реальном времени разнородных требований к закону управления при постоянно изменяющихся условиях потребления электроэнергии;
- принадлежность к определённой ситуации внешних воздействий на уровень потребления электроэнергии конкретной технологической установки;
- низкие затраты на внедрение принципов нечёткого управления для решения ЗОПЭ при проектировании и создании нового технологического оборудования;
- возможность использования результатов нечётких выводов, сделанных системой в рамках решения ЗОПЭ, для других целей управления и автоматизации, например, обеспечения защитных функций силовых агрегатов.

## БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время в ряде прикладных систем используются алгоритмы нечёткого управления, основанные на нечётких производственных правилах либо нечётких отношениях (реляционные системы). Самая главная трудность при внедрении нечёткого управления в технологическом оборудовании — отсутствие подробных производственных правил для управления объектом, увязанных с особенностями технологического процесса.

Аналогичные проблемы существуют и в плане решения ЗОПЭ в промышленном оборудовании, так как на сегодняшний день применительно к снижению потребления электроэнергии не разработаны какие-либо правила с системой предпосылок и выводов, хотя уже существуют экспертные и управляющие системы, построенные на чёткой методологии в рамках искусственного интеллекта и являющиеся частным случаем систем с нечётким управлением режимами потребления электроэнергии.

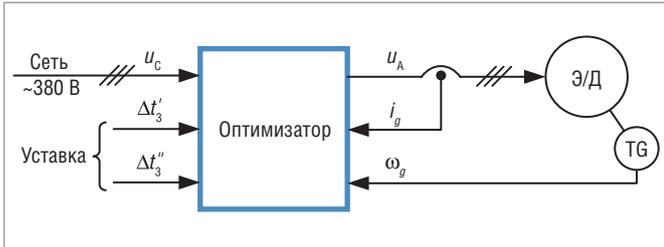
В качестве примера приведём несколько правил, характеризующих режимы работ оптимизатора асинхронного электродвигателя (АД), встроенный сигнальный процессор которого обеспечивает постоянный мониторинг эффективности работы, подавая на АД такое значение напряжения, которое необходимо для обеспечения требуемого момента на валу.

1. Если нагрузка на валу электродвигателя стала низкой, то необходимо уменьшить напряжение на его зажимах. В данном случае выражение, стоящее после «если», принято называть антецедентом, то есть предпосылкой, условием, а выражение после «то» — заключением, выводом, операцией.
2. Если общее время снижения нагрузки очень малое, то напряжение не снижать (оставить на прежнем уровне).
3. Если значение ошибки частоты вращения малое после снижения напряжения, то работу продолжить без изменения уровня напряжения.
4. Если нагрузка на валу АД стала высокой, то необходимо увеличить напряжение.
5. Если общее время увеличения нагрузки на валу АД очень малое, то напряжение не увеличивать (оставить на прежнем уровне).

Обозначим полное пространство предпосылок и заключений (выводов) приведённых правил соответственно  $X$  и  $Y$ . Каждое из правил, очевидно, отражает особенность ситуации при функционировании этого устройства (входная часть) и содержание нечёткого вывода после сопоставления значения параметра в условии с имеющейся информацией, получаемой в результате наблюдения или нормализации данных измерительной системы. Результатом вывода каждого правила в простейшем случае может быть некоторое число, характеризующее меру соответствия данной ситуации условию правила либо сформированное нечёткое множество.

В технических системах нечёткое множество интерпретируется функцией принадлежности, определяемой на интервале значений некоторой величины. Не исключается для каждой величины и набор функций принадлежности, содержащий несколько функций принадлежности, перекрывающих всю область изменения искомой величины.

Для рассматриваемого примера целью нечёткого управления является оптимизация потребления электроэнергии электроприводом за счёт подбора и установки необходимого



**Условные обозначения:**

Э/Д – электродвигатель;  $\Delta t_3'$  – уставка времени снижения нагрузки на валу;  $\Delta t_3''$  – уставка времени увеличения нагрузки на валу;  $i_g$  – действующее значение тока фазы асинхронного электродвигателя АД, измеряемого датчиком тока ДТ;  $\omega_g$  – частота вращения вала АД, определяемая датчиком (энкодером) ТГ;  $u_c$  – уровень напряжения сети;  $u_A$  – уровень напряжения на зажимах АД.

**Рис. 1. Структурная схема оптимизации уровня напряжения**

уровня напряжения, соответствующего значению нагрузки на валу при установленных ограничениях, вытекающих из эксплуатационных характеристик приводного электродвигателя (рис. 1).

Окончательный вывод для проведения соответствующей операции осуществляется системой управления после сопоставления входных частей приведённых правил с наблюдаемой (измеренной) информацией о системе ( $i_g, \omega_g, u_c$ ) и значениями уставок ( $\Delta t_3', \Delta t_3''$ ).

В данном примере нечёткое множество «оптимальное напряжение на зажимах АД» ( $U_A$ ) представляется обобщённой функцией принадлежности, определяющей характер частного вывода каждого правила. В других задачах не исключают-

ся индивидуальные выходные функции принадлежности для каждого правила, и тогда результирующий вывод может быть получен, например, с помощью принципа MIN-MAX [2]. На рис. 2 приведены варианты графического представления нечётких множеств  $t'_L, \omega_L, P_H, t''_L, U_A$ .

Для отображения нечёткого множества  $U_A$  принята колоколообразная функция принадлежности. Например, проверка степени принадлежности конкретного значения  $u_{A1}$  к нечёткому множеству «оптимальное напряжение на зажимах АД» даёт результат 0,5 и означает, что на 50%  $u_{A1}$  принадлежит оптимальному уровню напряжения, при котором потребление электроэнергии минимальное. Нечёткое множество  $u_{A1}$  в полном пространстве  $Y$  (рис. 2в) определяется в замкнутом интервале действительных чисел:

$$K(Y) \rightarrow [0, 1]$$

Оценка степени принадлежности к нечёткому множеству на пространстве заключений  $Y$  выбранного значения напряжения  $u_{A1}$ :

$$KU_A(u_{A1}) = 0,5$$

Очевидно, что указанные нечёткие множества предпосылок, так же как и выходное нечёткое множество, строго определяются только с помощью конкретных функций принадлежности, оценочные значения (параметры) которых могут быть получены одним из следующих методов:

- расчётным путём, исходя из эксплуатационных характеристик приводного электродвигателя и вида нагрузки на валу (стартовые значения параметров);
- проведением натурального эксперимента с хронометрированием данных;

## Система расширения интерфейсов MI/O

### Гибкая разработка компьютерных систем

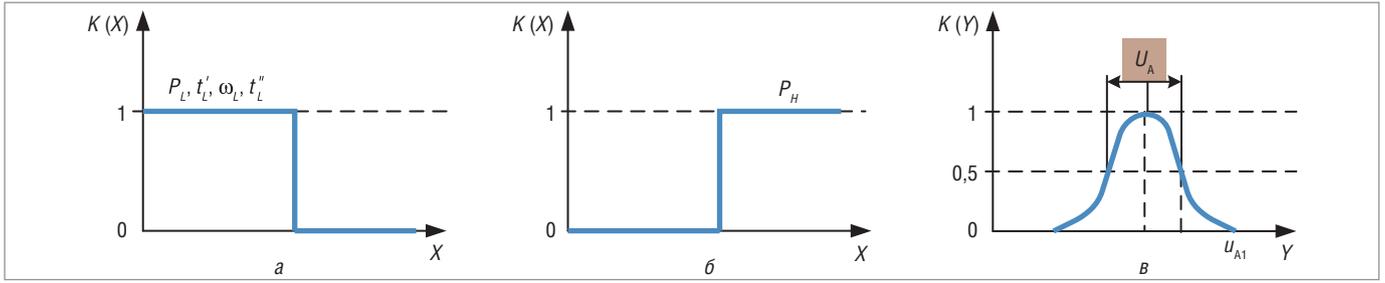
**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР**

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

[WWW.PROSOFT.RU](http://WWW.PROSOFT.RU)

Реклама

**ADVANTECH**  
*Enabling an Intelligent Planet*



**Условные обозначения:**

$U_A$  – нечёткое множество «оптимальное напряжение на зажимах АД»;  $P_L$  – нечёткое множество «низкая нагрузка»;  $t'_L$  – нечёткое множество «малое время снижения»;  $\omega_L$  – нечёткое множество «ошибка частоты вращения»;  $P_H$  – нечёткое множество «высокая нагрузка»;  $t''_L$  – нечёткое множество «время увеличения нагрузки мало».

**Рис. 2. Графическое представление нечётких множеств**

- имитационным моделированием с помощью специальной программы путём перебора всех возможных комбинаций значений входных переменных (разумеется, в ограниченных пределах действительных значений) для оценки уровня напряжения на зажимах АД;
- использованием специальных программных пакетов, эмулирующих работу конкретной нечёткой системы, например, общеизвестного и доступного приложения Fuzzy Logic Toolbox к популярной программе MATLAB;
- применением специальных микроконтроллеров, реализующих алгоритм нечёткого управления с постоянной адаптацией к изменениям нагрузки и процедурой обучения, позволяющей выбрать оптимальные параметры функций принадлежности, используя при этом в качестве предварительной информации только установленную структуру правил

и стартовые значения параметров, полученных, например, с помощью несложных расчётов.

В качестве примера рассмотрим организацию оптимального потребления электроэнергии в схеме управления электроприводами гидростанции в системе мощного гидропривода горнопроходческой машины, упрощённая электрическая функциональная схема которой приведена на рис. 3.

Электродвигатели  $M1$  и  $M2$  привода гидростанции подключены к силовой сети электроснабжения индивидуально, по идентичной схеме, включающей:

- вводной автоматический выключатель защиты от перегрузки и сверхтоков  $QF1$  ( $QF2$ );
- линейный контактор  $KM1$  ( $KM2$ );
- быстродействующие предохранители защиты от токов КЗ силовой схемы Powerboss Integra  $FU1-FU3$  ( $FU4-FU6$ );

# Quality AnalytiX®

## Система управления качеством процессов





- Статистический контроль качества в режиме реального времени
- Интерактивные контрольные диаграммы
- Стандартные отчеты
- Расчет параметров управляемости процесса
- Использование данных расчетов для генерации сообщений
- Возможность работы через браузер на любом устройстве, включая смартфоны и планшеты



Новый уровень качества производства с Quality AnalytiX!



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU



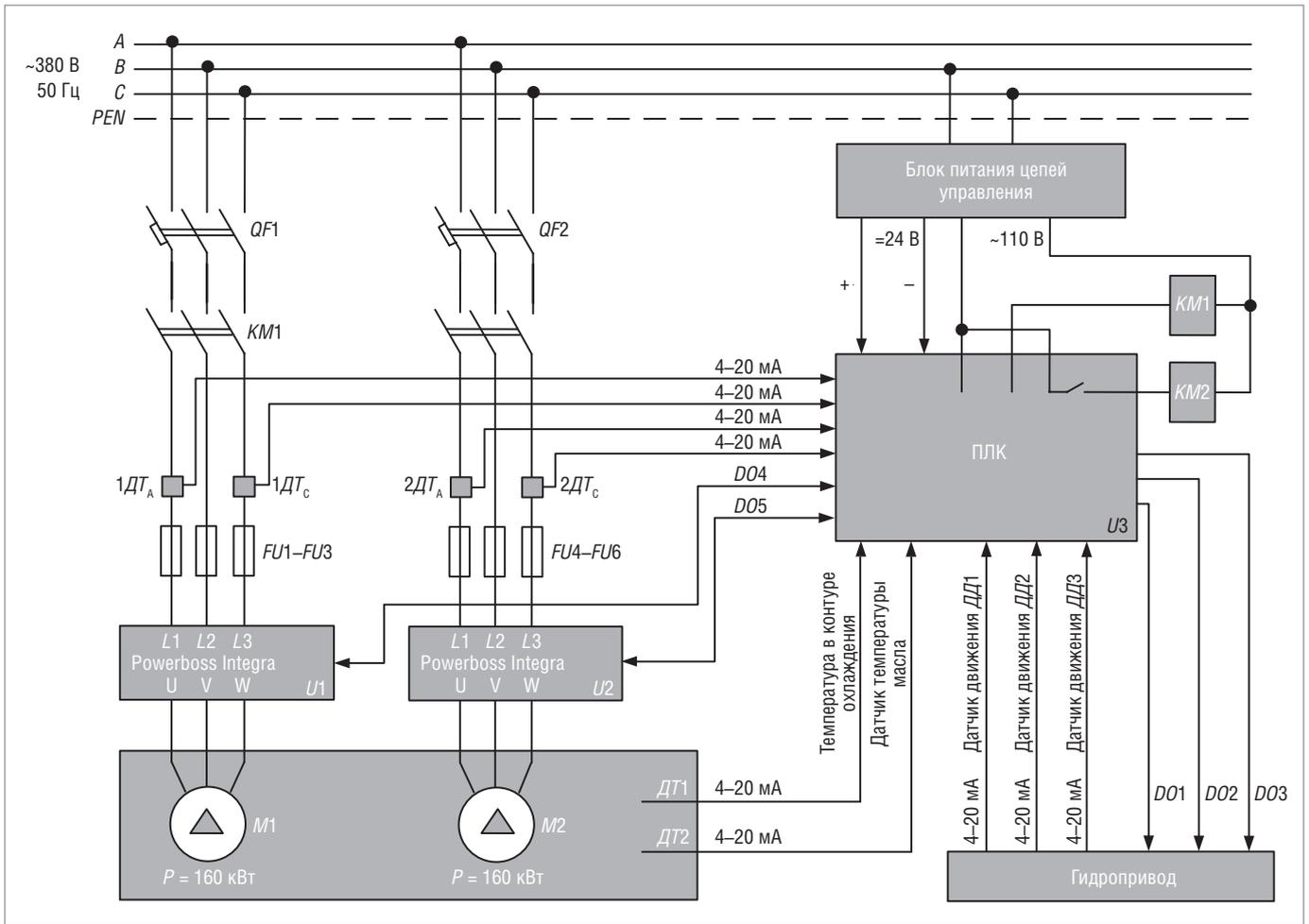


Рис. 3. Упрощённая электрическая функциональная схема электропривода гидростанции

● устройство плавного пуска Powerboss Integra с функцией оптимального регулирования напряжения на клеммах электродвигателей  $U1$  ( $U2$ ).

В качестве информационной платформы для функционирования управляющей программы ПЛК и станции управления в целом используется сенсорная подсистема, содержащая:

- датчики тока  $1DT_A$  ( $2DT_A$ ),  $1DT_C$  ( $2DT_C$ ) для измерения значений тока нагрузки электродвигателей  $M1$  и  $M2$  соответственно;
- датчик температуры масла гидростанции;
- датчик температуры контура охлаждения;
- датчики давления  $ДД1$ ,  $ДД2$ ,  $ДД3$  для измерения избыточного давления в магистралях гидросистемы (главный привод, основной и вспомогательный насосы).

Исполнительные сигналы управления производительностью гидропривода ( $DO1$ ,  $DO2$ ,  $DO3$ ), уровнем напряжения ( $DO4$ ,  $DO5$ ) на клеммах электродвигателей  $M1$  и  $M2$  формируются от ПЛК по результатам анализа режима работы гидропривода с помощью управляющей программы ПЛК. Кроме этого, оптимизационная программа устройств плавного пуска  $U1$  и  $U2$  за счёт непрерывного контроля нагрузки электродвигателей и значений сигналов  $DO4$ ,  $DO5$  экономит часть энергии возбуждения и снижает потери, а также улучшает коэффициент мощности в те периоды времени, когда электродвигатели используются неэффективно при пониженной нагрузке (рис. 3). Кроме этого, управляющей программой принимается решение о целесообразности одновременной работы двух электродвигателей и в случае значительной раз-

грузки гидропривода (снижения расхода) посредством сигналов  $DO4$ ,  $DO5$  производится отключение одного из приводных электродвигателей с соответствующей оптимизацией уровня силового питающего напряжения на выходе устройства плавного пуска.

Управляющая программа ПЛК реализована на основе алгоритма нечёткого управления. Подобное решение используется для оптимизации режима работы электроприводов гидростанции мощных литейных машин, имеющих насосы с регулируемой производительностью, и когда контролируется необходимость снижения или увеличения объёмной скорости впрыска. В частности, аналогичная система реализована при модернизации устройства управления немецкой машиной для литья пластиковых масс под давлением KUASY на одном из предприятий оборонной промышленности. По данным наблюдений с помощью ведения архива на флэш-карте, снижение потребления электроэнергии составило 21%, что в значительной степени ускорило окупаемость средств, затраченных на модернизацию агрегата.

### ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В настоящее время создано и используется множество управляющих нечётких систем, решающих различные задачи в промышленном оборудовании, включая и оптимизацию потребления электроэнергии, например в частотно-регулируемом электроприводе и мощных преобразовательных устройствах [3], [4].

Тем не менее, решение ЗОПЭ на основе нечётких алгоритмов управления на сегодняшний день не имеет выраженной



## CompactPCI ■ Компьютеры специального назначения

**Блочные корпуса** с различными механическими характеристиками, в том числе с ударопрочностью до **25g**

Эффективное электромагнитное экранирование

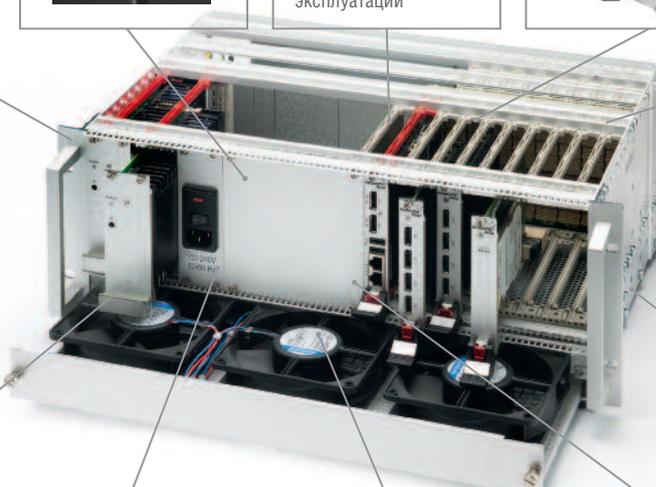
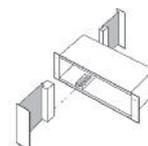


**Процессорные модули PICMG 2.0, 2.16, 2.30; CPCI-S.0 (Serial)** на различных процессорных платформах AMD и Intel для работы в жёстких условиях эксплуатации

**Кросс-платы и модули расширения PICMG 2.0, 2.16, 2.30, CPCI-S.0 (Serial)**



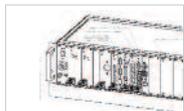
Подключение модулей тыльного ввода-вывода



**Источники питания** одинарные или резервированные: встраиваемые или в виде сменных блоков



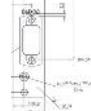
**Панели ввода** с клеммами заземления и разъёмами питания разных типов



**Вентиляторы** с возможностью «горячей» замены. Система охлаждения, в том числе с кондуктивным отводом тепла



**Лицевые панели** универсальные и заказные для вставных блоков



**Различные габариты** и варианты компоновки



направленности. Применительно к решению ЗОПЭ встаёт вопрос об информационном обеспечении синтеза нечётких систем управления уровнем потребления электроэнергии. Вполне очевидно, что вряд ли имеет практический смысл пытаться решить этот вопрос в рамках какой-нибудь систематизации и упорядочивания по причине огромного многообразия энергоёмкого технологического оборудования. Для любой установки или устройства, подключённого к силовой промышленной сети, необходимо знать как минимум:

- перечень переменных, характеризующих условия электропотребления и состояние системы в целом;
- какими параметрами можно управлять, чтобы эффективно влиять на уровень потребления электроэнергии в различных режимах работы;
- перечень переменных, значение которых можно измерить доступными техническими средствами;
- эксплуатационные режимы работы силового электрооборудования;
- технологические циклы и режимы работы установки.

Построение системы нечёткого управления в задачах минимизации потребления электроэнергии немисливо без полноценного информационного обеспечения, включающего:

- разработку производственных правил для конкретной технологической установки;
- создание эффективных методов формализации входных и выходных переменных с помощью нечётких множеств и функций принадлежности;
- наличие наборов нечётких множеств, характеризующих входные и выходные переменные;

- генерацию правил вывода, соответствующих данной ситуации и в определённой степени влияющих на конечный вывод;
- разработку механизма формирования адекватного управляющего воздействия по конечному результату нечёткого вывода (процедуры дефазсификации).

### Выводы

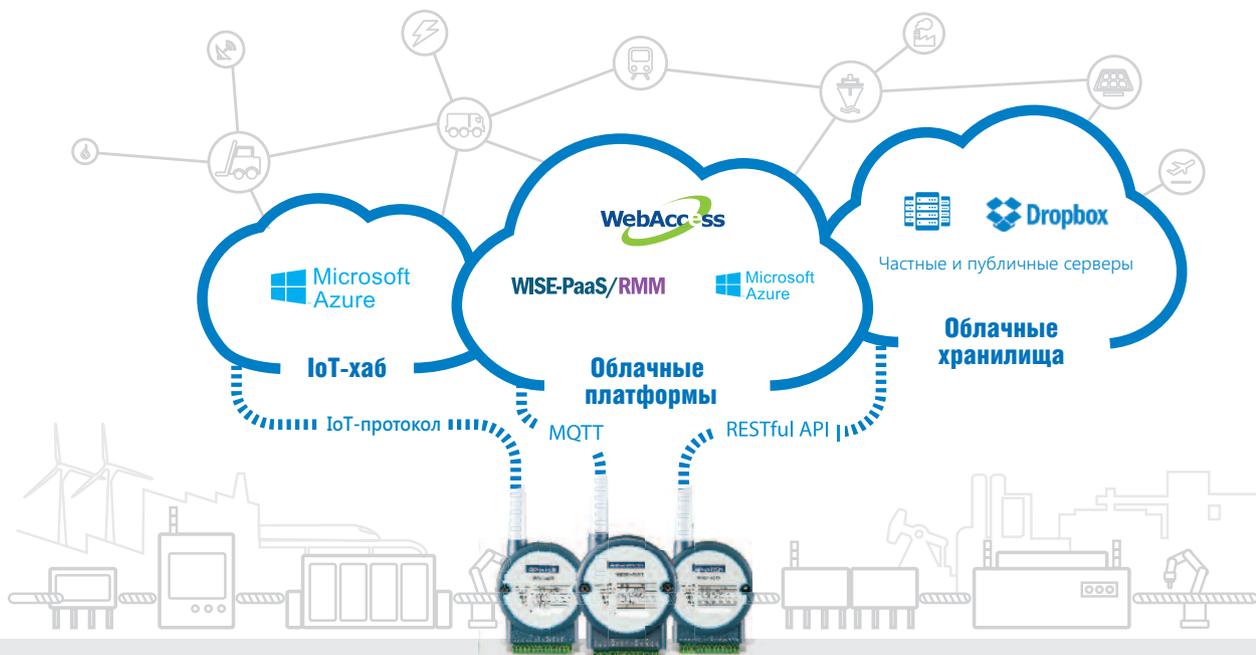
Достижение ощутимых результатов снижения расхода электроэнергии за счёт внедрения оптимизационных алгоритмов нечёткого управления возможно при условии глубокого знания технологического процесса и эксплуатационных режимов работы конкретного оборудования, что определяется в ходе проведения его детального обследования с последующей разработкой и формированием адекватной информационной базы. ●

### Литература

1. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс : пер. с англ. — М. : Радио и связь, 1988.
2. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др. Прикладные нечёткие системы : пер. с яп. — М. : Мир, 1993.
3. Клевцов А.В. Основы рационального потребления электроэнергии : учеб. пособие для вузов. — Вологда : Инфра-Инженерия, 2017.
4. Клевцов А.В. Бесконтактные устройства пуска и торможения электродвигателей : учеб. пособие для вузов. — Вологда : Инфра-Инженерия, 2017.

E-mail: akis\_tula@inbox.ru

## Превращаем в Интернет вещей



PROSOFT®

ADVANTECH  
Premier Partner

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU



Реклама



ЛУЧШЕЕ СООТНОШЕНИЕ  
ЦЕНА – КАЧЕСТВО



### Встраиваемые компьютеры MPT-3000/MPT-7000

- Процессор Intel Atom E3845/Core i7-6600U
- Диапазон рабочих температур –40...+70°C
- Поддержка двух сотовых сетей
- Модульный DC/DC-преобразователь
- Вибростойкость и ударопрочность
- Специализированные модули расширения MiniPCIe
- Внешний слот расширения PCIe (у MPT-7000)

### Панельные компьютеры BYTEM-103/BYTEM-123

- Диагональ дисплея 10,4"/12,1"
- Диапазон рабочих температур –40...+70°C/–25...+55°C
- Проекционно-ёмкостная сенсорная мультитач-панель
- Процессор Intel Atom E3845
- Степень защиты по передней панели IP65 и с тыльной стороны IP54

### Ультразероформатные моноблоки ARD-028/ARD-038

- Диагональ дисплея 28"/38", разрешение 1920 × 360/540, яркость 700 кд/м<sup>2</sup>
- Встроенный одноплатный компьютер на базе процессора Intel Atom E3825/Pentium N4200

