

Основы структурно-функциональной организации встроенных и автономных нечётких систем управления

При решении задач оптимизации потребления электроэнергии (ЗОПЭ) структурно-функциональное построение нечётких систем управления (НСУ) исходит из конкретных условий потребления электроэнергии и принципов функционирования определённой технической системы, будь то компрессорная или насосная станция, устройство преобразования электроэнергии, система питания, мощное пусковое устройство или статический компенсатор реактивной мощности. К основным аспектам работы при определении структуры и функций НСУ следует отнести:

- детальный анализ принципа функционирования технической системы, потребляющей электроэнергию;
- изучение технологической задачи, реализуемой с помощью данной технической системы;
- определение возможности реального снижения электропотребления за счёт оптимизации режимов работы электрооборудования без ухудшения выходных параметров;

- проведение сравнительной комплексной оценки реализации решения ЗОПЭ с помощью традиционных алгоритмов управления, основанных на построении чётких структур: экстремальное или адаптивное управление, прямой поиск и т.д.;
- определение возможности решения ЗОПЭ на основе располагаемых аппаратно-программных ресурсов управляющей системы, находящейся в эксплуатации;
- разработка структуры и функций встраиваемой или автономной НСУ в случае отсутствия возможности реализации в рамках существующей архитектуры аппаратно-программных средств.

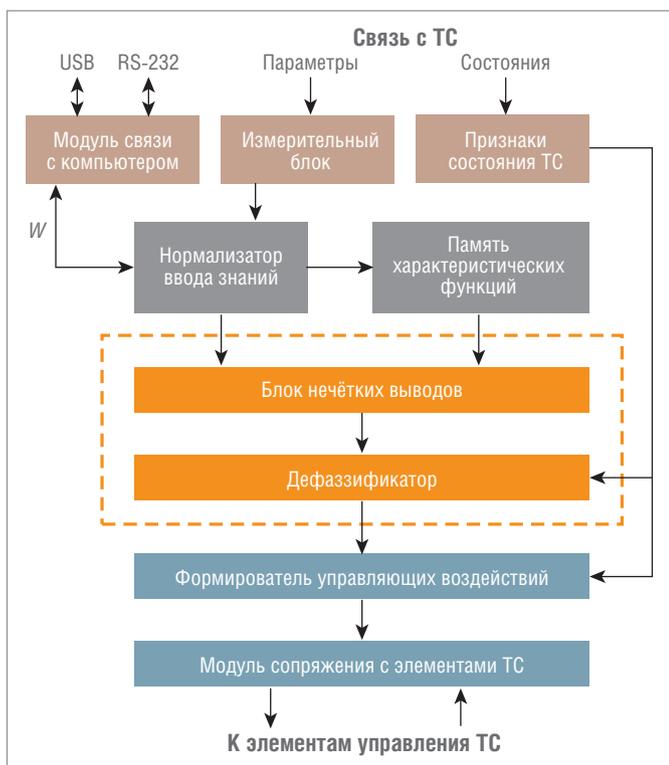
Информационной базой для проведения последней работы должен послужить свод производственных правил, разработанных для конкретной задачи оптимизации потребления электроэнергии.

На рис. 1 представлена обобщённая структурная схема нечёткой системы управления, отдельные блоки которой, в зависимости от характера взаимодействия с элементами технической системы, могут быть представлены многообразными вариантами исполнения.

В плане реализации измерительный блок является устройством сбора и согласования сигналов различных типов, включая термодатчики, аналоговые сигналы в диапазоне ± 10 В с одновременной оцифровкой. Примечательным и коренным отличием от логического или вычислительного устройства, предназначенного для выполнения программы чёткого (детерминированного) управления, является наличие в структуре НСУ блока нечётких выводов и дефаззификатора (от англ. "defuzzification" – формировавателя управляющего воздействия по конечному результату нечёткого вывода).

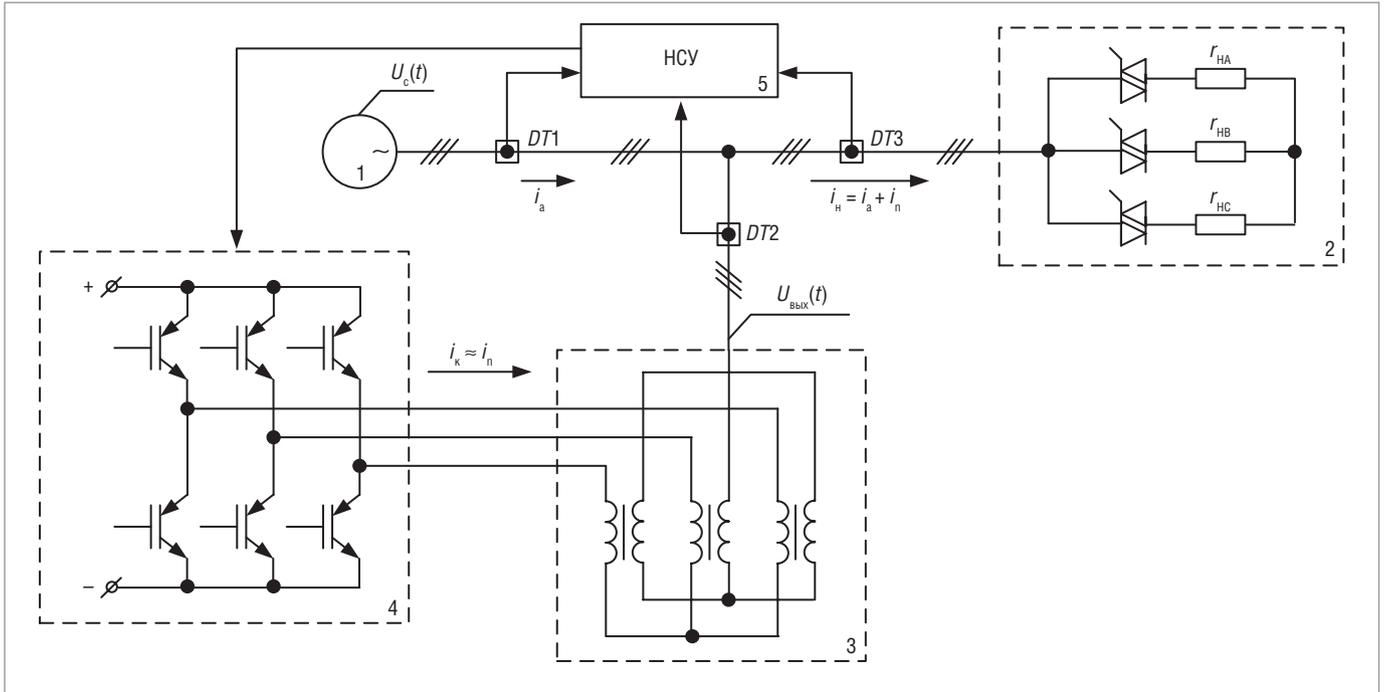
СТАТИЧЕСКИЕ КОМПЕНСАТОРЫ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Рассмотрим функционально-алгоритмическое построение средств оптимизации потребления электроэнергии на примере нечёткого управления статическим компенсатором неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки. Известно, что желаемой формой потребляемого тока для силовой трёхфазной сети (ТС) переменного тока является синусоидальная, когда коэффициент мощности любой ТС будет максимально приближен к единице, что даст возможность сэкономить на эксплуатационных затратах и повысить энергетические показатели. В связи со стремительным развитием силовой электроники перспективными устройствами для решения данной



Условные обозначения: W – канал ввода знаний (нечёткой информации); ТС – техническая система.

Рис. 1. Обобщённая структурная схема нечёткой системы управления



Условные обозначения: 1 – питающая система; 2 – электротехническая установка; 3 – блок развязывающих трансформаторов; 4 – компенсационный источник напряжения; 5 – нечёткая система управления; U_c – напряжение питающей сети; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение источника питания; i_a – активная составляющая тока нагрузки; i_k – компенсационный ток; i_n – пассивная составляющая тока нагрузки; i_H – ток нагрузки; r_{HA}, r_{HB}, r_{HC} – сопротивление электротехнической установки по каждой фазе; $DT1, DT2, DT3$ – датчики тока

Рис. 2. Структурная схема статического компенсатора неактивных составляющих

задачи становятся статические компенсаторы неактивных составляющих (СКНС).

На рис. 2 приведён вариант упрощённой структурной схемы СКНС. Питающая система 1 нагружена электротехнической установкой 2, например, трёхфазным регулятором мощности. Выход компенсатора 4, представляющего собой мостовой трёхфазный инвертор на IGBT-транзисторах, включается через развязочные (разделительные) трансформаторы 3 параллельно между питающей сетью и нагрузкой. Информация о мгновенных значениях тока нагрузки i_H , компенсационного тока i_k , тока питающей сети i_a с помощью датчиков тока $DT1, DT2, DT3$ поступает в НСУ. Электромагнитные процессы в этой схеме отражает дифференциальное уравнение:

$$u_c(t) = u_{\text{вых}}(t) - L \frac{di_k}{dt},$$

где $u_c(t)$ – мгновенное значение напряжения питающей сети; $u_{\text{вых}}(t)$ – мгновенное выходное напряжение компенсационного источника питания 4.

Ток нагрузки состоит из активной составляющей тока нагрузки и пассивной составляющей, представляющей ток гармонических составляющих, который может определяться [1] как:

$$i_H(t) = i_n(t) - i_a(t) = i_H(t) - \frac{S_H}{U_c} u_c(t) \cos \varphi_H = i_H(t) - \frac{P_H}{U_c} u_c(t),$$

где U_c – действующее значение напряжения сети, P_H – активная мощность нагрузки.

Условием полной компенсации пассивной составляющей тока нагрузки $i_n(t)$ является:

$$i_k(t) = -i_n(t).$$

Тогда

$$u_{\text{вых}}(t) = L \frac{di_H(t)}{dt} + L \frac{P_H du_c(t)}{U_c^2 dt} + u_c(t).$$

Данное выражение и определяет напряжение компенсационного источника, при котором обеспечивается требуемое

значение компенсационного тока при заданных параметрах силовой схемы: активной мощности нагрузки P_H , действующего напряжения сети U_c , индуктивности вторичной обмотки разделительного трансформатора L .

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОМПЕНСАЦИИ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Если в реальном времени производить вычисление выходного напряжения $u_{\text{вых}}(t)$ и формировать аналоговый сигнал управления ШИМ-модулятора, то для этого потребуются значительные вычислительные ресурсы, что и определяет высокую цену.

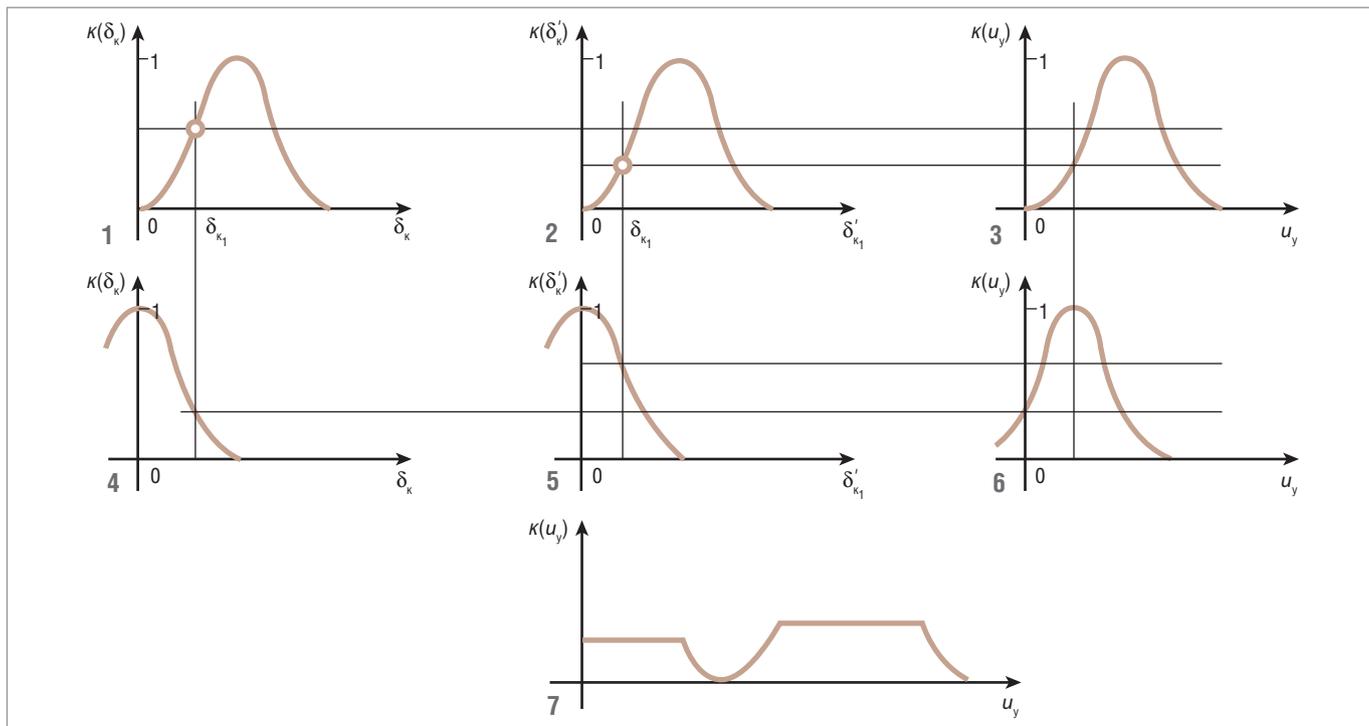
Как будет выглядеть решение с использованием алгоритма нечёткого управления?

Переменной, характеризующей состояние системы, является значение пассивной составляющей i_n , которое определяется НСУ в каждом цикле, исходя из измеренных текущих значений тока нагрузки i_H и напряжения сети U_c . Для управления выходным напряжением $u_{\text{вых}}(t)$ компенсационного источника НСУ используются значения ошибки компенсации $\delta_k = i_k - i_n$ и производной δ'_k .

Уровень активной мощности нагрузки P_H также определяется в каждом цикле по замеренным мгновенным значениям напряжения сети U_c и тока нагрузки i_H .

В данном случае просматриваются два правила:

- если ошибка δ_k и её производная δ'_k не равны нулю, то управляющий сигнал u_y в компенсационном источнике также не равен нулю, то есть, если $\delta_k \neq 0$ и $\delta'_k \neq 0$, то $u_y \neq 0$;
- если ошибка δ_k и её производная δ'_k равны нулю, то управляющий сигнал u_y в компенсационном источнике также равен нулю, то есть, если $\delta_k = 0$ и $\delta'_k = 0$, то $u_y = 0$.



Условные обозначения: u_y – управляющий сигнал; δ_k – ошибка компенсации; δ'_k – производная ошибки компенсации; $\kappa(\delta_k)$ – относительное значение функции принадлежности ошибки компенсации; $\kappa(\delta'_k)$ – относительное значение функции принадлежности производной ошибки компенсации; $\kappa(u_y)$ – относительное значение функции принадлежности управляющего напряжения u_y .

Рис. 3. Иллюстрация формирования нечёткого вывода: 1...7 – фазы формирования вывода

На рис. 3 показана примерная иллюстрация формирования нечёткого вывода по алгоритму Мамдани [1]. В данном примере использована типовая форма функции принадлежности – гауссовская (gaussmf), причём каждая из входных величин (δ_k , δ'_k) представлена набором функций принадлежности, перекрывающих их возможный диапазон изменений (рис. 4).

По конкретному значению ошибки δ_k , измеренной в цикле, сделаны два частных вывода (см. графики 3 и 6 на рис. 3), по которым сформирован окончательный нечёткий вывод для данного момента времени. Вывод получен по ранее упомянутому в [1] принципу MIN-MAX: выход на нечёткое множество каждого правила «обрезается», затем «обрезанные» выходные функции (графики 3 и 6 на рис. 3) объединяются операцией максимума (график 7 на рис. 3). Операция дефаззификации (получение конкретного значения) управляющего напряжения для компенсационного источника определяется НСУ любым из известных методов [2], например, центроидным или наибольшего максимума (LOM – Largest of Maximums).

Очевидно, что требования к аппаратным ресурсам НСУ для управления источником компенсационного напряжения в основном сосредоточены в измерительных возможностях микроконтроллера и в наличии сравнительно небольшой энерго-

независимой памяти, необходимой для хранения дискретного представления функций принадлежности с определённым шагом квантования.

УВЕЛИЧЕНИЕ КПД ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЁТ НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время существуют комплексные системы экстремального управления, позволяющие производить в реальном времени поиск рабочей точки с максимальным КПД насоса при минимуме суммарных потерь энергии в электроприводе и поддержании требуемой постоянной производительности. При их реализации часто не учитывалось то обстоятельство, что работа при максимальном КПД насоса не всегда сопровождается минимальными потерями в электроприводе. Кроме этого, важной особенностью таких систем является то, что для обеспечения их работоспособности необходимо постоянное согласование шагов и амплитуд поиска минимальных потерь в двигателе (Δt , ΔU – шаг времени и выходного напряжения источника питания соответственно) и максимума КПД (Δh , Δf_c – шаг изменения напора и частоты напряжения сети соответственно). При этом контур поиска максимума КПД должен адаптироваться к колебаниям частоты вращения электродвигателя в окрестностях точки минимальных потерь при условии непрерывного изменения. В этом случае техническая реализация такого двухконтурного регулятора не может быть простой и по стоимости будет составлять достаточно весомую часть в общем балансе затрат на создание технических средств управления насосными агрегатами.

В качестве альтернативы рассмотрим вариант системы на базе нечёткого алгоритма оптимизации, в основе которого сочетание возможностей встроенной в преобразователь частоты (ПЧ) функции оптимизации потерь в приводном асинхронном двигателе (АД) и нечёткого регулятора КПД насоса (рис. 5).

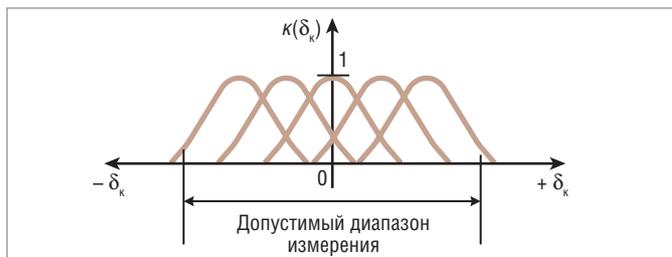
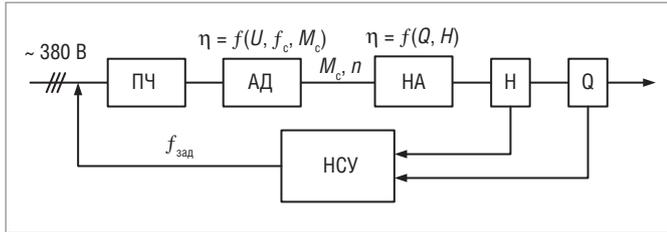


Рис. 4. Набор функций принадлежности $\kappa(\delta_k)$ в допустимом диапазоне измерений: δ_k – ошибка компенсации



Условные обозначения: ПЧ – преобразователь частоты; АД – асинхронный электродвигатель привода насосного агрегата; НА – насосный агрегат; Н – датчик напора; Q – датчик производительности; НСУ – контроллер нечёткой системы управления; $f_{\text{зад}}$ – заданная частота сети; f_c – частота сети; U – напряжение питания; M_c – статический момент на валу; n – число оборотов вала электродвигателя в минуту; η – КПД.

Рис. 5. Вариант структурной схемы организации нечёткого управления насосным агрегатом

Задачей системы является обеспечение максимально возможного КПД насосной установки при условиях обеспечения минимальных потерь в АД и поддержания необходимой производительности.

При соответствующей инициализации ПЧ и включении штатной функции энергосберегающего управления с момента ввода в работу встроенный контроллер ПЧ производит оценку мощности нагрузки на валу АД и в случае её изменения управляет выходным напряжением $U_{\text{АД}}$ таким образом, что обеспечивается только требуемая мощность потребления электроэнергии при частоте $f_{\text{зад}}$ (рис. 5). В то же время контроллер нечёткой системы управления производит в соответствии с алгоритмом нечёткого управления пошаговую корректировку уровня задания частоты вращения АД ($f_{\text{зад}}$) таким образом, чтобы рабочая точка соответствовала максимально-му КПД насоса с минимальным потреблением электроэнергии при требуемой постоянной производительности.

Алгоритм основан на анализе и выборе в реальном времени оптимального сочетания характеристик и физических параметров, характеризующих режим работы насосного агрегата: напор, производительность, зависимость КПД от гидравлического сопротивления. При этом в полной мере используются

возможности функции энергосберегающего управления промышленных преобразователей частоты насосных серий.

Выводы

На сегодняшний день для оптимизации потребления электроэнергии весьма перспективны решения, основанные на совместном использовании энергосберегающих функций типового промышленного оборудования (преобразователей частоты, устройств плавного пуска, управляющих средств различных технологических комплексов и т.д.) и возможностей автономных специальных устройств, реализующих алгоритмы нечёткого управления [3, 4]. В качестве автономных НСУ могут применяться бюджетные встраиваемые промышленные платформы на базе широко используемых в настоящее время различных серий микроконтроллеров (STM32, Pic, Atmel и т.д.), сочетающих достаточно высокую производительность, функциональность, низкое энергопотребление с относительно низкой ценой. Не исключается применение практически любого программируемого логического контроллера, обладающего достаточными аппаратно-программными ресурсами и соответствующей конфигурацией. За последние 10 лет ООО «НПП «АКИС» реализован ряд проектов по снижению потребления электроэнергии на основе использования НСУ в различных отраслях промышленного производства, с которыми можно ознакомиться на сайте компании «АКИС». ●

Литература

1. Клевцов А.В. Оптимизация потребления электроэнергии. – М.: Перо, 2015.
2. Клевцов А.В. Основы рационального потребления электроэнергии: учеб. пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2017.
3. Клевцов А. Системы нечёткого управления уровнем потребления электроэнергии в промышленном оборудовании // Современные технологии автоматизации. – 2018. – № 1.
4. Клевцов А., Зимогляд Д. Методы создания производственных правил оптимизации потребления электроэнергии // Современные технологии автоматизации. – 2018. – № 2.

E-mail: akis_tula@inbox.ru

НОВОСТИ НОВОСТИ НОВОСТИ НОВОСТИ НОВОСТИ НОВОСТИ

Встретимся в Москве: определена тематика осенней выставки «Передовые Технологии Автоматизации – 2018»

17–19 октября 2018 года в рамках Российской недели электроники и автоматизации свои экспозиции впервые объединят знаковые отраслевые мероприятия – выставки ChipExpo и «ПТА» («Передовые Технологии Автоматизации»), в павильоне «Форум» центрального выставочного комплекса «ЭКСПОЦЕНТР».

В этом году деловая программа мероприятия ещё глубже раскроет самые насущные и острые вопросы автоматизации промышленности с помощью ИТ-технологий, робототехники, облачных сервисов. Вот круг тем, который будет охвачен докладчиками – ведущими специалистами компаний, занятых разработкой, производством и дистрибуцией новейшего оборудования и программного

обеспечения для АСУ ТП и встраиваемых систем:

- кибербезопасность на промышленном предприятии;
- промышленный Интернет вещей (IIoT);
- промышленная автоматизация на пути к Industry 4.0;
- встраиваемые системы.

В рамках деловой программы запланирована дискуссия между докладчиками и приглашёнными ключевыми экспертами рынка об интересующих всех вопросах развития отрасли, вызовах и возможностях, которые сулит эпоха Industry 4.0.

Свои технологии и решения для всех уровней промышленной автоматизации ведущие

компании рынка представят в следующих разделах:

- автоматизация промышленного предприятия;
- автоматизация технологических процессов;
- бортовые и встраиваемые системы;
- измерительные технологии;
- робототехника и мехатроника;
- облака, IoT, Big Data в промышленности.

Экспозиция будет сформирована с учётом тематики деловой программы, чтобы гости «ПТА» получили комплексное представление о заинтересовавших их продуктах и решениях и ответы на все возникшие вопросы.

Также в этом году вновь будет предоставлена возможность поучаствовать в технологических турах – специализированных тематических экскурсиях на стенды компаний-участниц. ●