

Источник генерировал периодический двухфазный сигнал амплитудой 100 В и переменной частотой, указанной на рис. 4, а. Моделирование проводилось со следующими параметрами фильтра: $R = 0,01$ Ом; $C = 40$ мкФ; $L = 0,01$ Гн.

Исходя из соотношений для преобразования $\alpha, \beta \rightarrow A, B, C$ [5], амплитуда соответствующего ему трехфазного сигнала равна 81,6 В. Перед LC-фильтрами на сигнал накладывались шумы, имитирующие ШИМ, амплитудой в 2 раза большей амплитуды полезного сигнала и частотой 4 кГц. Дискретность алгоритма УК составляла 100 мкс. На рис. 4, б; 4, в; 4, г, соответствующих высоким, средним и низким частотам, показаны желаемый сигнал фазы А U_A – кривая 1, скомпенсированный отфильтрованный U_{A1} – кривая 2 и отфильтрованный без компенсации – кривая 3.

Как видно из рис. 4, компенсационный фильтр работоспособен во всем диапазоне частот ± 50 Гц, при этом имеет 3 % ошибку в амплитуде, обусловленную шумами, по амплитуде превосходящей полезный сигнал в 2 раза. Компенсационный фильтр снижает амплитуду шумов в 54 раза при отсутствии искажений главной гармоники по амплитуде и фазе.

Экспериментальная проверка предлагаемого фильтра представлена в работе [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирован алгоритм работы упреждающего компенсатора фильтра для коррекции в реальном времени задающего сигнала ШИМ. С помощью этого алгоритма можно получить на выходе пассивного LC-фильтра желаемый отфильтрованный сигнал без искажений главной гармоники по фазе и амплитуде. С помощью компенсационного фильтра предотвращается износ изо-

ляции и уменьшаются потери на нагрев двигателя. Система компенсации входит в состав основной программы управления ПЧ и не требует дополнительной аппаратуры. Численное моделирование подтвердило работоспособность синтезированного алгоритма в диапазоне частот сигнала ± 50 Гц. Предложенный метод компенсации подходит для всех двигателей с АИН с ШИМ.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Das J. C. Passive Filters – Potentialities and Limitation // IEEE Trans. Ind. Applicat., Jan./Febr. – 2004. – Vol. 40, No. 1. – Pp. 232–241.
2. Kojima M., Hirabayashi K., Kawabata Y., Ejiogu E. C., Kawabata T. Novel Vector Control System Using Deadbeat-Controlled PWM Inverter With Output LC Filter // IEEE Trans. Ind. Applicat., Jan./Febr. – 2004. – Vol.40, No. 1. – Pp. 162–169.
3. Salomaki J., Hinkkanen M., Luomi J. Sensorless Control of Induction Motor Drives Equipped With Inverter Output Filter // IEEE Trans. on Ind. Electronics. – 2006. – Vol. 53, No. 4. – Pp. 1188–1197.
4. Хойджен П. Фильтры для частотных инверторов // Chip News. – 2002. – № 8. – С. 58–60.
5. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
6. Потапенко Е. М., Соломаха А. В., Савранская А. В. Экспериментальное исследование аналого-цифровых адаптивных фильтров трехфазных сигналов // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – № 66. – С. 271, 272.

Надійшла 17.10.07

Синтезовано алгоритм роботи попереджувального компенсатора, який усуває скривлення амплітуди та фази, що внесені пасивним фільтром. Чисельне та натурне моделювання підтвердило працездатність синтезованого алгоритма.

The predictive compensator algorithm, eliminating distortions of amplitude and phase, brought in the passive filter, is synthesized. Numerical and natural modeling of serviceability of the synthesized algorithm has confirmed.

УДК 681.52.136

В. Е. Цыганаш, В. М. Зверев, Ю. С. Белоиваненко

АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ТУРБОАГРЕГАТЕ

Рассмотрены технологические аспекты и проблемы производства электроэнергии на теплоэлектроцентрали. Изложена концепция оптимального управления процессом преобразования энергии в турбоагрегате.

В настоящее время очень большую роль в повышении использования энергетических затрат играет удельный вес энергетической составляющей в себестоимости промышленной продукции. В отдельных отраслях промышленности доля комплексных энергетических

затрат в себестоимости промышленной продукции составляет более 50 %, в черной металлургии – до 40 %, в машиностроении – 20–30 %. Но и тогда, когда энергетическая составляющая в себестоимости незначительна, необходимо учитывать, что при экономном расходовании энергии появляется возможность выработки дополнительной продукции, а ущерб при недоотпуске энергии во много раз превышает ее стоимость. Следовательно, значение экономии энергии выходит далеко за рамки снижения себестоимости продукции, потери энергии – это бесполезно сгоревший уголь, газ и т. д.

Традиционно в потреблении энергии выделяют три составляющие: потребление электроэнергии, потребление теплоэнергии, сжигание топлива. Следует отметить, что в технологическом процессе большинства теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) одновременно задействованы все три составляющие. Современная ТЭЦ представляет собой комплекс на основе различных динамических подсистем, выполняющих разнообразные технологические функции. Это подсистема производства тепловой энергии с помощью паровых котлов; подсистема преобразования тепловой энергии в механическую посредством турбоагрегатов; подсистема генерации электрической энергии посредством синхронных генераторов электрической энергии. Все подсистемы связаны между собой процессами интенсивного взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией.

В настоящее время разработка энергосберегающих технологий для таких систем ведется в двух направлениях. Первое направление связано с процессами регистрации, учета и документирования потребляемой энергии. Оно проработано в достаточной степени и на хорошем уровне, но не затрагивает динамических процессов, происходящих в системах. Второе направление посвящено локальным системам управления энергопотребителями. Оно почти исчерпало свои возможности. Как правило, энергоблоки работают в базовых режимах и практически не используют возможность работы в широком диапазоне нагрузок. В этой связи возникает важная проблема повышения коэффициента полезного действия (КПД) и маневренности агрегатов, решение которой для парогенерирующих установок означает расширение диапазона нагрузок и тепловых режимов, в рамках которой система управления котлом способна обеспечить его эффективную и устойчивую работу. При этом основное препятствие состоит в ограниченных возможностях существующих линейных систем управления энергоблоками. В связи с этим, наряду с заменой элементной базы регуляторов на более современную, основное внимание необходимо уделять совершенствованию принципов и методов управления объектами в целом. Прежде всего, это относится к программному управлению, оптимальному управлению и введению гибкого адаптивного управления. Перспективность этих направлений обусловлена

наличием экстремальной зависимости в процессах энергопреобразования и ее расположением не только на границе, но и в самой области допустимых значений переменных.

Главные проблемы разработок при таком подходе связаны с уникальностью решаемых задач, с изменчивостью задач, объектов управления, структуры системы и ее математического обеспечения, широкими пределами измерений; большим числом датчиков, высоким быстродействием. Для решения задач оптимального управления необходимо знать закономерности, определяющие ход оптимизирующего процесса, его математическую модель. Однако, создание самой модели, синтез уравнений, определяющих множество допустимых решений, в свою очередь, приводят к необходимости решения оптимизационных задач.

Целью настоящей работы является анализ одной из подсистем для поиска новых алгоритмов управления, которые можно было бы распространить на все подсистемы и которые бы обеспечили в дальнейшем надежную генерацию электроэнергии необходимого качества с одновременной минимизацией расхода энергоносителя и, следовательно, себестоимости электроэнергии.

Для реализации подобного подхода удобно выбрать турбоагрегат, преобразующий тепловую энергию в механическую и представить его, в свою очередь, состоящим из двух подсистем – «источника питания» (ИП) и «нагрузки» (Н). Взаимодействие между энергопоставляющей частью (ИП) и энергопотребляющей частью (Н) можно охарактеризовать «сложными понятиями», такими как КПД, напор, импеданс, резонанс и т. п. Основная функция этой системы – энергетические преобразования, которые должны учитывать всю энергию, потерянную или обмененную в турбоагрегате.

Отметим, что «сложные понятия» образуют связь между основными физическими закономерностями и практической задачей. Они могут не учитывать некоторые детали, но должны дать основу для анализа. Основным критерием их выбора является не истинность или строгость, а полезность [1]. Они являются ключевыми элементами математической модели (теории) и, кроме того, позволяют дать сжатую механистическую интерпретацию результатам измерений. Они служат каркасом, поддерживающим более конкретные и подробные знания об объекте [1]. Пользуясь такими качественными понятиями, сформулируем задачу оптимального управления.

При заданном расходе энергоносителя (пара) требуется обеспечить максимальное давление в камере турбины, если же давление в камере необходимо поддерживать постоянным, то расход энергоносителя должен быть минимальным. Для перехода к математической постановке задачи введем обозначения для переменных, характеризующих процесс. С этой целью рассмотрим упрощенную схему турбоагрегата (рис. 1).

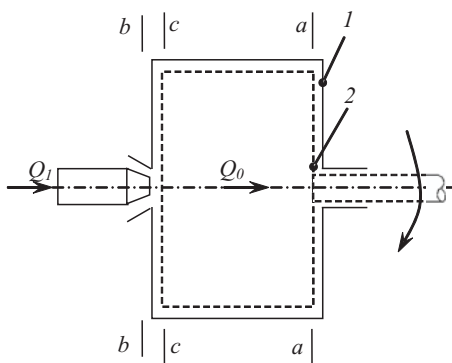


Рисунок 1 – Упрощенная схема турбоагрегата:
1 – корпус турбины; 2 – турбина

Сущность его работы основана на передаче энергии от одной среды (рабочей, в данном случае это пар), движущейся с большой скоростью, к другой среде, обладающей значительно меньшим запасом энергии. Передача энергии происходит в процессе такого взаимодействия, при котором поток пара при входе на лопасти рабочего колеса турбины имеет избыток давления, по сравнению с потоком, выходящим из турбины. При движении пара через криволинейные межлопастные каналы поток оказывает реактивное давление на лопасти, приводя во вращение рабочий вал турбины. При этом кинетическая энергия рабочей среды частично превращается в механическую, а частично теряется вследствие значительного вихреобразования, потерь на трение и потерь в элементах турбины, подводящих и отводящих пар.

Допустив для упрощения анализа, что плотность смешиваемых потоков одинакова, для основных параметров подсистем ИП-Н, можно записать [2]:

1) рабочий напор, затрачиваемый в турбоагрегате

$$H_p = \frac{P_b}{\rho g} + \frac{V_b^2}{2g} - \frac{P_c}{\rho g} - \frac{V_c^2}{2g};$$

2) полезный напор, создаваемый в области (с-с) входа пара в лопасти рабочего колеса турбины и равный разности этого напора и напора области (а-а) выхода пара с лопастей рабочего колеса турбины

$$H_n = \frac{P_c}{\rho g} + \frac{V_c^2}{2g} - \frac{P_a}{\rho g} - \frac{V_a^2}{2g};$$

3) расход пара

$$Q_1 = V_1 S_1;$$

4) полезная подача (эквивалентная величина, определяемая при пересчете из получаемой механической мощности на валу турбины):

$$Q_0 \cong V_0 S_0.$$

В приведенных зависимостях принято:

P_b, P_c, P_a – давление пара на выходе из сопла котлоагрегата, входе на лопасти рабочего колеса и выходе с лопастей рабочего колеса турбины, соответственно;

V_b, V_c, V_a – скорости потока пара на выходе из сопла котлоагрегата, области входа в лопасти рабочего колеса и области выхода с лопастей рабочего колеса турбины;

V_1, V_0 – скорости в рабочем сопле котлоагрегата и турбины;

S_1, S_0 – площадь рабочего сопла и эквивалентная площадь сечения турбины;

ρg – удельный вес единицы объема потока пара, представленный через его плотность ρ и ускорение силы тяжести g .

Учитывая принятые обозначения и традиционный подход, при котором энергетическая эффективность любого процесса передачи или преобразования энергии оценивается коэффициентом полезного действия, выберем в качестве критерия оптимальности КПД. Он для турбоагрегата равен отношению полезной мощности к затраченной:

$$\eta = \frac{H_n Q_0}{H_p Q_1}. \quad (1)$$

Выбор этого критерия приводит к тому, что при выделении множества допустимых значений переменных приходится учитывать три типа ограничений: ограничения, наложенные на вектор режимных и конструктивных параметров, ограничения на вектор, характеризующий параметры рабочего потока пара, а также зависимость, характеризующую полный баланс энергии.

Если первые два типа переменных в реальных условиях учитываются сравнительно просто, то уравнение связи между энергетическими преобразованиями в удобном для практического применения виде представить сложно. Поэтому за основу удобно взять характеристику турбоагрегата, описывающую его работу при переменных режимах. Ее можно получить при условии $H_n + H_p = \text{const}$, близком к типичному случаю эксплуатации турбоагрегата.

Главная особенность характеристики в том, что она имеет выраженный максимум в зоне, где сумма потерь смешения и потерь в тракте преобразования энергии минимальна. В этих условиях можно воспользоваться методом косвенной оптимизации с применением модели, выполненной в форме экстремального принципа и инвариантной к системе координат, в которой рассматривается моделируемый процесс. Как показывает практика, при этом не требуется высокой точности модели. Поэтому представляется целесообразным применение модели, воспроизводящей свойства реальной системы ИП-Н не во всей допустимой области протекания процесса, а только в небольшой ее части, включающей и оптимальную траекторию. В этом случае

схема, имитирующая модель, должна обладать избирательностью и фазовой селективностью. Сочетания этих качеств можно достичь при использовании устройства с управляемыми колебательными контурами высокой добротности [3].

Прежде чем анализировать другие компоненты системы управления, использующей модель [3], выделим доминирующие переменные, которые затем можно использовать в качестве управляющих воздействий, и преобразуем критерий оптимального управления к более рациональному виду.

Если первое условие выполнить не трудно, поскольку ключевыми переменными процесса являются давление и расход энергоносителя, то второе условие не является столь очевидным. Согласно уравнению (1) максимальное значение КПД достигается при максимуме полезной мощности и минимуме затраченной. Практической реализации этого критерия в системе управления препятствует противоречивость условий и трудности оперативного измерения некоторых составляющих мощности. Поэтому, учитывая, что $\frac{P_a}{\rho g} \ll \frac{P_c}{\rho g}$

и пренебрегая разностью $\frac{V_c^2}{2g} - \frac{V_a^2}{2g}$ из-за малости этой разности, запишем

$$H_n \cong \frac{P_c}{\rho g} - \frac{P_a}{\rho g} = \frac{P_c}{\rho g} \left(1 - \frac{P_a}{P_c} \right).$$

Воспользовавшись возможностью представления $\left(1 - \frac{P_a}{P_c} \right)$ в форме биномиального ряда, перестроим выражение для H_n :

$$H_n \cong \frac{P_c}{\rho g} \frac{1}{1 + \frac{P_a}{P_c}}.$$

Если учесть, что в установившемся режиме работы турбоагрегата Q_0 и H_p изменяются мало и эти изменения одного знака, поскольку увеличение (уменьшение) H_p сопровождается увеличением (уменьшением) Q_0 , то и изменение $\frac{Q_0}{H_p}$ будет малым. Поэтому решающее влияние на КПД будет оказывать отношение

$$\frac{H_n}{Q_1} = \frac{P_c}{\rho g} \frac{1}{Q_1 \left(1 + \frac{P_a}{P_c} \right)}.$$

Из этого отношения следует, что максимум КПД достигается при выполнении условия

$$\frac{\rho g}{P_c} \left(1 + \frac{P_a}{P_c} \right) Q_1 \rightarrow \min.$$

Использование критерия оптимальности в такой форме предпочтительнее, так как он сравнительно просто вычисляется, поскольку все переменные, входящие в формулу, допускают непосредственное измерение. Особенно важно то, что вычисления можно вести в реальном времени в течение хода технологического процесса с помощью аналоговой модели [3].

Получив таким путем информацию об оптимальном решении, управлять процессом поддержания механической мощности можно, регулируя расход пара на входе в турбину, изменяя противодействие на выходе или комбинируя оба варианта. Первый вариант управления требует воздействия на мощный энергетический поток, что дорого, и, к тому же, сопровождается значительными дополнительными потерями энергии. Второй вариант не имеет недостатков, отмеченных в первом варианте, но характеризуется малым диапазоном изменения управляющего воздействия. Поэтому для управления более всего подходит третий вариант, когда расход пара на входе устанавливается примерно достаточным для решения технологической задачи, а достижение максимума КПД обеспечивается коррекцией противодействия.

Принципиальная возможность изменения КПД противодействием была экспериментально обоснована в работе [4]. Подтверждено существование оптимальной «зоны смещения» и доказана возможность изменения ее положения. При этом может достигаться максимум КПД, а экономия энергоносителя может составить 8–15 %.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Каннинггэм Р. Сжатие газа с помощью жидкоструйного насоса // Труды американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. – М.: Мир, 1974. – № 3. – С. 112–128.
2. Цыганаш В. Е., Волошин А. И. Постановка задачи оптимального управления процессом создания и поддержания вакуума с помощью струйного насоса // Вестник национального технического университета «ХПИ». Новые решения в современных технологиях. Сборник научных трудов. – 2001. – № 14. – С. 206–212.
3. Цыганаш В. Е. Метод моделирования электрического режима индукционной электротермической установки // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: Зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'янськ, 2000. – С. 316–319.
4. Каннинггэм Р., Допкин Р. Длины участка разрушения струи и смешивающей горловины жидкоструйного насоса для перекачки газа // Труды американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. – М.: Мир, 1974. – № 3. – С. 128–141.

Надійшла 1.03.07

Розглянуті технологічні аспекти та проблеми виробництва електроенергії на теплоелектроцентралі. Викладена концепція оптимального управління процесом енергоперетворення в турбоагрегаті.

Technological aspects and problems of manufacture of the electric power on thermal power main lines are considered. The concept of optimum control by energy transformation process in a turbine unit is stated.