УДК 62-83.004.15
Наука

Цыганаш В.Е. /к.т.н./
Донбасская ГМА

О стабильности и устойчивости системы управления мощным энергопотребителем

В работе проведен анализ стабильности и устойчивости системы управления мощным энергопотребителем, определена функция А.М. Ляпунова. Приведено уточнение представления о связи между математической моделью, физической реальностью и функцией А.М. Ляпунова. Предложена схема системы управления на основе беспоисковой самонастраивающейся системы, обеспечивающей параметрическую стабильность процесса энергопреобразования. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: *энергопотребитель, параметрическая стабильность, устойчивость, беспоисковая самонастраивающаяся система управления*

In the study the analysis of stability and sustainability of a control system of the powerful power consumer is given, A.M. Lyapunov's function is defined. The clarification of the perception of the relation between the mathematical model, physical reality and the function A.M. Lyapunov is given. The control system scheme on a basis of without-search self-adjusted system providing parametrical stability of power transformation process is offered.

Keywords: *the power consumer, parametrical stability, sustainability, searchless self-adjusted control system*

Традиционные методы проверки устойчивости системы управления и её запаса, используемые в настоящее время, основанные на исследовании характеристического полинома или матрицы коэффициентов нормальной формы Коши заведомо не полны, не во всех случаях могут дать правильный ответ [1]. Это в равной степени можно отнести и к методам, использующим классические амплитудно-частотные характеристики, теорию робастной устойчивости и другие [2]. Такое положение опасно тем, что может быть нарушено важнейшее требование обеспечения стабильности, т.е. сохранения устойчивости замкнутой системы при неизбежных на практике малых отклонениях параметров объекта управления или регулятора от расчетных значений. О возможности возникновения подобной ситуации предупреждалось еще в классической монографии [3].

Не обеспечивает всегда достоверных ответов и методика, основанная на втором методе Ляпунова и построении функций Ляпунова. Исследуемая система может иметь хорошую функцию Ляпунова и в то же время – нулевой запас устойчивости. Подчеркнем особо, что верности теорем Ляпунова подобные случаи не опровергают, но система устойчивая, и имеющая в то же время нулевой запас устойчивости с практической точки зрения может быть иногда небезопасной [4]. Вместе с тем нельзя не отметить, что имеется обширный класс систем, в особенности среди мощных энергопотребителей, когда желательно воспроизводить движение изображающей точки вдоль экстремалей, которое почти всегда неустойчиво и поэтому неизбежные малые погрешности в математической модели системы управления и действующих на нее сил приводят к отклонениям реального поведения системы от оптимального. В этой ситуации приходится довольствоваться зачастую сохранением хотя бы нулевого запаса устойчивости.

Таким образом, практическая необходимость исследований в этом направлении очевидна. Поскольку наиболее опасными в отношении потери устойчивости при малых вариациях параметров являются системы управления, в которых доступны измерению не все координаты, то особое внимание среди мощных энергопотребителей уделим именно таким системам. К ним, в первую очередь, можно отнести предельно нагруженные транспортные машины с электромеханическими приводами, электротермические установки (ЭТУ) такие как, например, дуговые сталеплавильные печи (ДСП), индукционные плавильные печи.

Целью настоящей работы являются вопросы анализа и синтеза, которые обеспечивают помимо минимума среднеквадратичного критерия качества также и стабильность замкнутой системы (т.е. сохранение устойчивости при малых отклонениях действительных значений параметров от расчетных), а также выполнение других практических требований к системе оптимального управления мощным энергопотребителем. Целью разработки является синтез адаптивной системы управления, реализующей заданный технологический алгоритм и обеспечивающей стабильность её работы.

В этом плане, как показывает практика [5], одним из наиболее эффективных критериев управления энергопотреблением может быть коэффициент использования мощности источника питания $K_n(t)$. Его связь с ключевыми параметрами технологического процесса открывает перспективу особо тесного взаимодействия с моделью.

Не менее важным является и то обстоятельство, что измерение и фильтрация, с одной стороны, и управление и регулирование, с другой стороны, находятся друг с другом в некоторой замечательной взаимосвязи, которая впервые была выяснена Калманом и сформулирована им как принцип двойственности [6].

Благодаря этому принципу по аналогии с механикой можно ввести относительную, абсолютную и переносную системы координат и для сигналов. Это открывает перспективу проведения декомпозиции для мощного энергопотребителя и представления его структуры в виде отдельных подсистем. Такой подход значительно упрощает анализ системы в целом. В частности, это делает возможным и проведение анализа на устойчивость и стабильность такой системы опираясь на её модель, которая выполняет и функции анализатора для сигналов, характеризующих ток и напряжение ЭТУ. За основу при построении такой модели взят управляемый модулированный фильтр, с помощью которого определяется величина отклонения мощности в ЭТУ от оптимального режима [7]. По сути это параметрическая модель, содержащая управляемый колебательный контур (КК) и управляемый по частоте генератор синусоидальных колебаний (УГ). Воздействия, характеризующие ток I и напряжение U силовой цепи ЭТУ, поступают одновременно на входы модели. При этом сигнал, представляющий ток, преобразуется с помощью генератора в частотно-модулированный сигнал *i*, который поступает непосредственно в КК, а сигнал, представляющий напряжение, воздействует на индуктивность L КК, изменяя его резонансную частоту. В результате процессы, происходящие во временной области, в КК преобразуются в фазо-частотную область и на выходе модели формируется сигнал, характеризующий оптимальное решение и отклонения от него. Этот сигнал характеризует $K_n(t)$, который также допускает декомпозицию и может быть представлен аддитивной и мультипликативной составляющими

$$K_n(t) = \frac{P_n(t)}{P_н(t)} = \frac{P_н(t) - P_{пот}(I) - Д_{р}(t)}{P_н(t)} =$$
$$= 1 - \frac{P_{пот}(I)}{P_н(t)} - \frac{(I\Delta U + U\Delta I)}{P_н(t)}, \qquad (1)$$

где $P_H(t) = U$ – фактическая мощность, которая может быть отдана источником питания в нагрузку; $P_n(t)$ – фактическая полезная мощность, выделяемая на нагрузке; $P_{пот}(I)$ – мощность потерь, зависящая от тока I силовой цепи; $\Delta P_p(t)$ - недоиспользованная мощность источника питания, возникающая в результате отклонения от оптимального режима по току на ΔI и по напряжению на ΔU; t – время.

Мультипликативная составляющая через параметры модели может быть представлена в виде

$$\Delta P_p(t) = L\Delta i + i\Delta L \qquad (2)$$

Модель в такой форме хорошо себя зарекомендовала при лабораторных и промышленных испытаниях на ЭТУ, но её аппаратная реализация достаточно сложна. В процессе испытаний она последовательно включалась с синхронным детектором в основной контур системы управления и выполняла функции регулятора, формирующего сигнал адаптации по результатам величины отклонения мощности от её экстремального значения.

Для оценки стабильности работы такой системы выберем метод пригодный как для линейных, так и для нелинейных систем. Для этого воспользуемся вторым методом Ляпунова, основанным на построении функции Ляпунова. Принимая во внимание возможность декомпозиции как самого объекта, так и $K_n(t)$ учтем, что это должна быть векторная величина, содержащая медленное движение (аддитивная составляющая) и быстрое движение (мультипликативная составляющая).

Пусть заданы в относительной системе отсчета уравнения в нормальной форме Коши [8]

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

где $f_i(x_1, x_2)$ в общем случае нелинейные функции, полученные при помощи модели-анализатора и зависящие от тока и напряжения ЭТУ.

В относительной системе отсчета для системы уравнений (3) характерно наличие нулевого решения $x_1 = x_2 = 0$, соответствующего оптимальному режиму работы ЭТУ, т.е. нахождению изображающей точки на экстремали процесса. Введем в рассмотрение функцию $\Psi = Li$ переменных x_1 и x_2, представляющую потокосцепление катушки КК, связанное с выходным сигналом модели, имитирующей $K_n(t)$. Пусть составляющая производной от этой функции $\Delta P_p(t) = 0$ когда $x_1 = x_2 = 0$, а ψ знакопостоянна при всех других значениях переменных.

Примером такой функции может служить функция $\psi = x_1^2 + x_2^2$. Физически функция ψ может быть представлена изображающей точкой, которая может находиться и на экстремали процесса, когда перетоки энергии в ЭТУ между источником питания (ИП) и нагрузкой (Н) уравновешены, а от ИП в нагрузку отдается максимальная мощность.

Вычислим теперь полную производную по времени функции ψ на решениях системы (3) или (следуя терминологии, принятой в теории управления) вычислим производную функции ψ в силу системы (3). Для этого, пользуясь известной формулой для полной производной

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial x_1}\cdot\frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial x_2}\cdot\frac{dx_2}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial L}\cdot\frac{dL}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial i}\cdot\frac{di}{dt}, \qquad (4)$$

подставим вместо каждой из производных $\frac{d\ \ _i}{d}$ ее значение из уравнений (3). Получим для производной в силу системы формулу

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial x_1} f_1(x_1, x_2) + \frac{\partial\psi}{\partial x_2} f_2(x_1, x_2) = \frac{\partial\psi}{\partial L} f_1(x_1, x_2) + [illegible]$$
$$+ \frac{\partial\psi}{\partial i} f_2(x_1, x_2) = i\frac{dL}{dt} + L\frac{di}{dt} \cong i\Delta L + L\Delta i \qquad (5)$$

Если функция ψ такова, что производная для всех x_i отрицательна, то такую функцию называют функцией Ляпунова. В данном случае это требование выполняется, так как в силу медленности изменения аддитивной составляющей производная от нее близка к нулю, а производная от мультипликативной составляющей равна – $\Delta P_p(t)$ (1, 2). Она входит составляющей в выходной сигнал модели, который характеризует напряжение на индуктивности КК.

Если такая функция существует, то, как доказано А.М. Ляпуновым, нулевое решение системы (3) асимптотически устойчиво. Если доказано существование функции Ляпунова, то вопрос об устойчивости решен. Найти функцию Ляпунова нелегко, поскольку общих методов отыскания ее в настоящее время не известно. Однако фактически нас всегда интересует не просто устойчивость, а сохранение устойчивости при вариации параметров. Поскольку при вариации параметров малый дрейф их неизбежен, то систему устойчивую, но теряющую устойчивость при сколь угодно малых вариациях параметров, по настоящему устойчивой считать нельзя [8]. По-видимому, основными факторами, приводящими к такой параметрической нестабильности системы являются не столько изменения параметров вообще, а изменения, приводящие к изменению вида дифференциальных уравнений, описывающих систему. Причем эти изменения являются решающими.

Непосредственной причиной их появления могут являться условия перехода изображающей точки, характеризующей процесс, через экстремаль, так как они могут приводить к резкому излому амплитудно-частотной характеристики системы и смене значения фазового угла на противоположное. Этот переход у мощного энергопотребителя может сопровождаться появлением новых возбуждающих факторов (источников энергии), а по Ляпунову предполагается, что возмущения налагаются только на начальные условия, иначе говоря, возмущенное движение происходит при тех же силах (источниках энергии), что и невозмущенное движение. Также предполагается, что устойчивость рассматривается на бесконечно большом промежутке времени и при малых возмущениях. С физической точки зрения (по Гельмгольцу) это означает, что «скрытые» движения в системе становятся явными и могут возрастать по мере ухода от оптимального режима. Это ведет к изменениям в энергетическом потоке между подсистемами «источник питания - нагрузка» в результате появления перетоков. Особую опасность такие перетоки представляют для мощных энергопотребителей, таких как ЭТУ, судовые двигатели, авиационные привода и др. [1]. Это связано с большими объемами перетоков энергии в таких потребителях и необходимостью работы систем вблизи границ устойчивости, т.е. вблизи экстремалей. Поэтому достижение равенства $x_1 = x_2 = 0$ подтверждает наличие в системе асимптотической устойчивости при достижении ею оптимального режима, при котором перетоки энергии взаимно сбалансированы (равны) и не влияют на «чистоту» квадратов составляющих Ψ. Примечательным также является то, что существование «чистых» квадратичных форм для Ψ в состоянии сбалансированности процесса сохраняется не только для оптимального режима системы, но и для других сбалансированных режимов. Это хорошо подтверждается экспериментально с помощью моделей [7]. В результате по Ляпунову система хотя и не будет асимптотически приближаться к установившемуся состоянию, но все же будет все время в достаточной близости от него.

Ориентируясь на это свойство функции Ляпунова, проведем анализ структурных особенностей реализуемой системы управления для одноступенчатого преобразователя энергии, например, для электромеханического преобразователя. Начнем с наиболее доступных для точного измерения переменных – тока I и напряжения U. С их помощью можно охарактеризовать структуру энергопотребителя как систему, содержащую две подсистемы ИП и Н. Математически их также можно представить как преобразователи $\frac{U^2}{z_1}$ и $I^2 z_2$, где U, I - действующие значения напряжения и тока в подсистемах ИП и Н соответственно, z_1, z_2 - полные сопротивления подсистем ИП и Н. Чтобы при таком представлении структуры системы проще учитывать динамику процессов, происходящих в ней, проведем ее агрегирование [9] и перейдем к единой определяющей переменной – мощности. Это позволит полнее охарактеризовать структуру энергопотребителя в целом, учесть взаимодействие подсистем ИП и Н между собой и уточнить представление о связи между математической моделью, физической реальностью и функцией Ляпунова. Переход к новой определяющей переменной наряду с более полной характеристикой структуры энергопотребителя не только дает возможность учесть энергоперетоки между подсистемами, но и подтверждает возможность единой математической декомпозиции системы на основе трех частных критериев $Р_н(t), Р_{пот}(I), Д_р(t)$. А это, в свою очередь, открывает перспективу получения составного критерия оптимального управления $K_n(t)$ для энергопотребителя в целом и дает основу для разработки математической модели системы.

Переход к $K_n(t)$ также позволяет произвести сочетание двух регуляторов в системе: оптимального и обычного, синтезированного исходя из заданных показателей качества системы регулирования.

Благодаря последней особенности для существенных отличий конечных значений $K_n(t)$ от его начальных значений используется оптимальный закон управления, а в области малых отклонений от цели управления система работает в режиме слежения. При дальнейшей детализации структуры естественно потребовать, чтобы система в процессе эксплуатации сама автоматически получала и использовала для синтеза желаемого регулирования недостающую информацию. При этом она приобретает новое качество – качество самонастройки.

Применение принципов самонастройки (адаптации) по сравнению с неадаптивным управлением позволяет вскрыть и реализовать целый ряд новых возможностей системы, поэтому остановимся на этом подробнее. Сами процессы адаптации удобно рассматривать отдельно для установившихся режимов и для динамики. Важной составляющей, которую иногда необходимо корректировать по ходу работы системы, являются потери мощности $\mathrm{P}_{\text{пот}}(\mathrm{I})$. Выбор и коррекция этой составляющей в схеме может быть реализована параметрически. Достигается это выбором рабочей точки модели в установившемся режиме на кривой подмагничивания КК - $\mu = f(B,H)$, где μ - магнитная проницаемость ферритовых колец колебательного контура модели; $f(B,H)$ - зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля. Плавное и монотонное изменение этой кривой в широком диапазоне позволяет без затруднений выбирать необходимый рабочий участок, характеризующий изменения $\mathrm{P}_{\text{пот}}(\mathrm{I})$ в выражении $K_n(t)$. При автоматическом поддержании $\Delta P_p(t) = 0$ это дает возможность формировать оптимальную программную траекторию работы системы. Если по ходу процесса возникает необходимость коррекции этой траектории, то эту операцию выполняет оптимизатор, функции которого возложены на оператора – лицо, принимающее решения (ЛПР). Необходимость такого вмешательства возникает при переходах с одного технологического или электрического режима работы энергопотребителя на другой. Обычно такая смена режима сопровождается значительными изменениями мощности, поступающей в систему, и обеспечивается изменением управляющего (задающего) воздействия и коррекцией выходных сигналов регуляторов объекта.

Характерной особенностью вносимых исправлений в работу системы управления мощным энергопотребителем является то, что они касаются только коррекции медленных движений в системе и поэтому не усложняют работу оптимизатора. Но их проведение оказывает влияние и на быстрые движения, источником которых в основном является контур самонастройки, внешние воздействия и возмущения.

В конечном счете вмешательство оптимизатора (ЛПР) направлено на то, чтобы достигалось состояние устойчивого динамического равновесия между подсистемами ИП и Н. Математическим условием его достижения и поддержания является $K_n(t) \to \max$, $\Delta P_p(t) = 0$ при заданном оператором значении управляющего воздействия. Для этого состояния также характерно, что влияние внешних воздействий, изменений параметров и помех в таком режиме стремится к минимуму. Математически поддержание этого состояния означает такое разделение (декомпозиция) дифференциального уравнения на две подсистемы, при котором процессы, характеризующие «быстрые» движения себя практически не проявляют и ими можно пренебречь.

Физически это состояние означает, что относительное движение в системе сведено к минимуму, несмотря на наличие переносного и абсолютного движений в подсистемах ИП и Н.

Если рассматривать ИП как «окружающую среду», а Н как объект в этой среде, то по аналогии с живой природой это состояние отвечает наилучшей приспособительной реакции живого организма на изменения в окружающей среде.

В заключение подчеркнем, что такой подход к управлению энергопотребителем позволяет: обеспечить работоспособность системы в условиях широкого изменения динамических свойств объекта, повысить надежность системы, унифицировать отдельные регуляторы или блоки регуляторов и приспособить их для работы с различными видами однотипных объектов.

Экспериментальная проверка приведенных технических решений в промышленных условиях на индукционной плавильной печи ИСТ-1М, и на двух дуговых печах ДСП-12 и ДСП-100 подтвердила возможность обеспечения устойчивости работы такой системы [10].

Библиографический список

1. Неожиданное в математике и его связь с авариями и катастрофами / Ю.П. Петров, Л.Ю. Петров – 4-е изд. перераб. и доп. – С.-Пб.: БХВ–Петербург, 2005. – 240 с.
2. Частотные критерии робастной устойчивости и апериодичности линейных систем / Б.Т. Поляк, Я.З. Цыпкин // Автоматика и телемеханика. – 1990 - № 9. – С. 45-54.
3. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.Л. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
4. Петров Ю.П. Математическая модель и физическая реальность. – С.–Пб. С.-ПбГУ, 1997. – 58 с.
5. Цыганаш В.Е. Разработка и обоснование критерия оптимального управления для мощного энергопотребителя // Вісник Донбаської ДМА. Зб. наук. пр. Краматорськ. - 2010. - № 2(19). – С. 286–290.
6. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг; пер. с нем. В.Б. Колмановского. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
7. Цыганаш В.Е. Анализ модели силовой электрической цепи мощной электротермической установки // Наук. пр. ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Вип. 58. – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – С. 130-135.
8. Петров Ю.П. Устойчивость линейных систем при вариациях параметров //Автоматика и телемеханика. – 1994. - № 11. – С. 186-189.
9. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация / А.А. Первозванский, В.Г. Гайцгори. – М.: Наука, 1979. – 342 с.
10. Цыганаш В.Е. Частотный метод оптимального управления мощными энергопотребителями // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2009. - № 2. – С. 120-123.

Поступила 21.03.2013

◆