

УДК 621-83.004.15

Цыганаш В. Е.

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА, ПОВЫШАЮЩЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Одной из задач при производстве стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) является увеличение доли лома, но она порождает большое количество проблем, связанных с интенсификацией теплообмена в рабочем пространстве печи. Период расплавления такой шихты сопровождается частыми обрывами дуг, короткими замыканиями, смещениями крупных кусков лома, поломками электродов. Положение усугубляется еще и тем, что современная ДСП является трехфазным агрегатом без нулевого провода, поэтому всякое изменение режима в одной из фаз вызывает нарушение режима в других фазах. В этих условиях штатные системы автоматического регулирования (САР) электродов становятся малоэффективными, а человек – оператор из-за ограниченности своих возможностей вынужден принимать решения с запаздываниями, то есть по устаревшей информации. В результате из-за большого уровня неопределенности при решении задачи выбора оптимального рабочего режима агрегата происходят сбои в типичной схеме действия человека – оператора [1, 2]:

- обнаружение изменения регулируемых переменных (входных сигналов – тока и напряжения);
- формирование программы двигательных реакций (управляющих воздействий, связанных с выбором рабочей точки агрегата в целом);
- осуществление контроля и коррекции этих реакций.

Все это ведет к значительному перерасходу электроэнергии, увеличивает число поломок электродов. Так, для ДСП-12 перерасход электроэнергии может достигать 30–40 тысяч кВт.ч ежемесячно.

Целью настоящей работы является такое выделение частотного диапазона работы мощного энергопотребителя, которое позволило бы лучше согласовывать его с частотным диапазоном лица, принимающего решения, и улучшило бы выбор эффективного рабочего режима для установки в целом.

Одним из путей преодоления трудностей, вызванных большим объемом информации и сложностью ее переработки, является «распараллеливание» процедур ее сбора и обработки. Однако децентрализация процесса обработки информации неизбежно требует определенного уровня децентрализации также и процедур принятия решений, то есть создания самостоятельно функционирующих систем.

Появление в системе отдельных элементов (звеньев), способных за приемлемое время (и цену) обработать всю относящуюся к ним информацию, способную учесть все изменения конкретной ситуации и получающих право принятия самостоятельных решений по тем или иным вопросам, означает появление в системе иерархической структуры.

Если рассматривать САР для отдельного электрода как автономную систему, то ее удобно представить в виде двух подсистем: «окружающая среда» и, собственно, «энергопотребитель». Взаимодействие между ними осуществляется через потоки информации (управляющая часть) и энергии (силовая или управляемая часть). Обычно в первой подсистеме допускается регулирование мощности, отбираемой из сети, а во второй имеется возможность влияния на нагрузку, исходя из условий протекания технологического процесса и допустимых условий эксплуатации оборудования. Материально управляемая часть (подсистема) может быть представлена в виде источника питания, работающего на силовую активно – индуктивно – емкостную цепь.

Проведенная таким образом декомпозиция автономной системы применительно к отдельному электроду (а их три в агрегате) позволяет получить структурную схему энергопотребления, отделить энергетическую часть от информационной, вскрыть сущность процессов, происходящих в системе, выявить роль и место человека-оператора (лица, принимающего решения – ЛПР) в процессе преобразования энергии. Однако, вскрывая сущность процесса энергопреобразования и роль в нем отдельных звеньев, этот подход не вскрывает инструмента, позволяющего снизить уровень неопределенности при принятии решений.

Чтобы наметить путь для решения этой задачи рассмотрим математические предпосылки для описания этих процессов. Математической моделью таких систем, характеризующих процессы энергопреобразования, являются нелинейные дифференциальные уравнения.

В настоящее время разработаны методы исследования нелинейных систем, близких к линейным. Для таких систем введением малого параметра выделяется «порождающая» (как правило, линейная) система, которая может быть легко исследована. Затем производится либо уточнение полученного решения методом последовательных приближений, либо решение отыскивается в форме рядов по малому параметру. В этой области имеется ряд фундаментальных результатов [3].

Что же касается существенно нелинейных систем, то здесь нет такой же законченности результатов, как в теории квазилинейных систем. Тем не менее, и здесь имеются важные для практики результаты, концентрирующиеся около двух направлений:

1. Метод усреднения Н. М. Крылова, Н. Н. Боголюбова и Ю. А. Митропольского, а также примыкающие к нему методы гармонического баланса Л. С. Гольдфарба и гармонической линеаризации Е. П. Попова.

2. Методы фазового пространства и, в частности, метод точечных преобразований, разработанные А. А. Андроновым и его школой.

Остановимся подробнее на характеристике указанных методов. В «методе усреднения» за счет усреднения правых частей по явно входящему времени производится сведение системы к автономной, в результате чего достигается ее упрощение. Для получения высших приближений используется некоторая замена координат, позволяющая в асимптотике учесть влияние членов с высшими степенями малого параметра. Именно эта замена координат, позволяющая упростить исходную систему (но не ее решения), является весьма выгодной при анализе автоматических систем.

Достоинством метода усреднения является также тот факт, что это – асимптотический метод. Дело в том, что формальные условия сходимости рядов по малому параметру настолько жесткие, что часто не выполняются на практике. Условия же сходимости асимптотических рядов значительно шире.

Подчеркнем, что метод усреднения не снимает трудностей исследования «порождающей» (усредненной) автономной системы, а аппарат его мало приспособлен для нужд теории автоматического управления.

Метод гармонической линеаризации основан на разложении решения в ряд Фурье. При этом нелинейность правой части учитывается при вычислении коэффициентов ряда в разложении нелинейной функции гармонического аргумента в ряд Фурье. Это, с одной стороны, обеспечивает соответствие метода природе нелинейной задачи, а с другой стороны, приводит к значительным вычислительным трудностям.

Эти трудности заметно возрастают при вычислении высших приближений (высших гармоник), когда громоздкость вычислений не позволяет выявить влияние параметров системы на процессы в ней. Поэтому метод гармонической линеаризации успешно применяется лишь в тех случаях, когда колебания в системе близки к гармоническим и достаточно ограничиться вычислением первой гармоники. В этом случае Е. П. Попову и его последователям удалось построить эффективные инженерные методики для исследования кусочно-линейных систем [4].

Метод фазового пространства (точнее его «рабочая часть» – метод точечных преобразований) позволяет исследовать практически любые системы второго порядка. При  $n = 3$  вычислительные трудности метода становятся весьма существенными, а при  $n > 3$  зачастую непреодолимыми.

В целом же можно отметить, что ни один из указанных методов (в том виде, в котором они существуют сейчас) не позволяет «вручную» (или с применением малого объема вычислений на ЭВМ) исследовать автоматические системы пятого, шестого и седьмого порядков с несколькими сложными нелинейностями и сложной картиной переходного процесса. В то же время практическая необходимость в таком методе очевидна, поскольку численные расчеты в принципе не способны обеспечить решение таких необходимых в инженерной практике задач, как выявление общих качественных закономерностей системы, ее «физики», учесть изменение параметров и структуру управляющего устройства на процесс регулирования и поведение объекта.

Поэтому естественно возникает задача, связанная с применением новых методов для исследования систем высокого порядка. Последнее, например, оказывается возможным, если удастся каким-либо образом расщепить систему на две подсистемы низкого порядка и исследовать каждую из подсистем независимо друг от друга. Такое расщепление системы составляет суть «метода разделения движений», при котором разделенные системы исследуются независимо друг от друга благодаря тому, что разделение движений осуществляется на основе предположения: переходный процесс по быстрым координатам (к положению равновесия, определяемому медленной координатой) происходит много быстрее, чем изменяется медленная координата. По этой упрощенной нелинейной модели дается качественная характеристика исходной системы [3].

Возможны и другие методы разделения движений, но суть их одна – исходная система уравнений расщепляется на две подсистемы, из которых одна – система быстрых движений – может быть (приближенно) исследована независимо от другой – системы медленных движений. При этом упрощенная математическая модель нелинейной системы так же является нелинейной.

В качестве одного из таких вариантов разделения движений проанализируем вариант, предложенный в работе [5]. Нелинейные процессы энергопреобразования, происходящие в активно-индуктивно-емкостной цепи отдельного электрода ДСП по аналогии с механикой представим как результат взаимодействия некоторых подсистем и введем понятие абсолютной, переносной и относительной систем отсчета для электрических сигналов.

Первая подсистема («источник питания» – ИП) выполняет функции окружающей среды для объекта и характеризует абсолютное движение, а результат взаимодействия ИП с объектом (подсистемой «нагрузка» – Н) характеризует относительное движение в системе в целом. Тогда переносное движение можно отождествить с подсистемой быстрых движений. Воздействуя на переменную ИП (напряжение), на нагрузку Н (ток) и изменяя параметры дуги можно регулировать и определяющую переменную – фактическую мощность, поступающую в нагрузку. Она может быть измерена киловаттметром. При этом прибор точнее фиксирует медленную составляющую и сглаживает огибающую быстрых движений, характеризующих мгновенную мощность удвоенной промышленной частоты источника питания. Медленная составляющая, являющаяся главной в процессе управления, визуально лучше определяется и оператором, чем, например, напряжение или ток, измеряемые вольтметром и амперметром для отдельной фазы агрегата. Происходит это из-за расширения частотного диапазона сигнала, измеряемого киловаттметром, как в сторону самых медленных движений, вплоть до появления постоянной составляющей мощности, так и в сторону самых быстрых движений до удвоенной промышленной частоты, что и позволяет оператору точнее определять мощности в отдельных фазах агрегата и корректировать по ним положение общей рабочей точки для трех фаз агрегата в целом с меньшими запаздываниями при принятии решений. Интересно отметить, что полученный эффект разделения движений усиливается и за счет снижения уровня помех

по мере приближения рабочей точки к траектории оптимального режима, являющейся экстремалью процесса энергопреобразования. При достижении оптимального режима быстрые движения в относительной системе отсчета себя почти не проявляют, несмотря на наличие переносного и абсолютного движений.

На подобную декомпозицию структурных схем и их предварительный анализ можно выйти, опираясь на модельные представления и на подход Гельмгольца. Рассмотрим это детальнее. Учтем, что действие для действительного движения в системе минимально и равно:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{Li^2}{2} - \frac{q^2}{2C} \right) dt,$$

где по первой системе аналогий [6]  $\frac{Li^2}{2}$  – кинетическая, а  $\frac{q^2}{2C}$  – потенциальная энергия системы,  $t$  – время. С другой стороны для материальной точки, движущейся без воздействия движущих сил, принцип наименьшего действия из всех возможных кривых дает в качестве траектории ту, на которой точка в определенное время с наименьшей скоростью достигает своей цели, то есть дает наикратчайшую линию.

Для уяснения сущности происходящего возьмем производную от кинетического потенциала  $h$ , чтобы выделить в нем ту часть составляющих движений, которые не зависят от времени при достижении системой состояния установившегося динамического равновесия:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{Li^2}{2} - \frac{q^2}{2C} \right] = \frac{1}{2} i \left[ \left( i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt} \right) + L \frac{di}{dt} - 2 \frac{q}{C} \right] \cong \frac{1}{2} i \left[ \Delta P_p(t) + L \frac{di}{dt} - 2 \frac{q}{C} \right].$$

В полученном выражении, характеризующем изменения мощности, особый интерес представляет состояние, наступающее при  $\Delta P_p(t) = 0$  и сопровождающееся компенсацией относительного движения в системе. Происходит это в результате возникновения «скрытого» движения для сигналов, характеризующих изменение мощности в системе. Экспериментальная проверка показывает, что остающаяся часть – это колебания собственной частоты управляемого контура, выполняющего функции модели системы.

Опираясь на модель [5], рассмотрим физическую сущность данного механизма. В этом режиме установившегося динамического равновесия все составляющие, характеризующие отклонения мощности от ее оптимального значения, взаимно компенсируются и не оказывают влияния на процесс энергопреобразования, то есть переводятся в режим «скрытых» движений. Это приводит к тому, что в модели прекращается отбор мощности от колебаний несущей частоты и ее амплитуда достигает максимума. При этом суммарные фазовые сдвиги низкочастотных составляющих, действующих на опережение и отставание от резонансной частоты колебательного контура становятся равными между собой.

В этом равенстве как отдельных составляющих, так и их сумм проявляется интегральный эффект исключения переменных в фазочастотной области. Подчеркнем, что равенство сумм можно интерпретировать и как специфику ортогональности. Это нашло свое отражение в работах, касающихся исследований и современной интерпретации понятия мощности [6–8], где рассматриваются условия равенства нулю суммы составляющих мощности, у которых токи и напряжения имеют разные спектры и соотношения гармоник. Если учесть, что действующее значение сигналов и активная мощность инвариантны к частоте, то это становится возможным, поскольку реактивную мощность по Фризе можно определить, как реактивную мощность эквивалентных по действующим значениям тока и напряжения и активной мощности синусоидальных сигналов [7].

Чтобы в модели, имитирующей систему в целом, наблюдался режим установившегося динамического равновесия, необходимо еще отсутствие влияния колебаний, поступающих от источника, на колебания в самом колебательном контуре (колебания собственной частоты). Эта независимость обеспечивается за счет их ортогональности (сопряженности по Гильберту). Это условие в данном случае эквивалентно условию трансверсальности. Оно во многом определяет максимальное значение амплитуды вектора, при котором изображающая точка двигается в действительности от одного положения к другому так, что средняя кинетическая энергия минус средняя потенциальная энергия достигают своего наименьшего значения.

### ВЫВОДЫ

Для поддержания оптимального режима в модели, выполненной в форме экстремального принципа, необходимо не только поддержание условий трансверсальности, но и выполнение условий симметрии, проявляющихся в совпадении (двойственности) экстремумов, во-первых, для низкочастотной части  $-\Delta P_p(t)$  и, во-вторых, для остающейся высокочастотной части производной от кинетического потенциала  $h$ .

Поэтому симметричность исключенных низкочастотных составляющих и ортогональность несущей и собственной частоты контура можно объединить в форме единого принципа – принципа симметрии, присущего оптимальному режиму энергопотребителя как системы в целом. В такой интерпретации он является аналогом условия трансверсальности во временной области.

Использование этого принципа для выделения и поддержания оптимального режима было опробовано в промышленных условиях на дуговой сталеплавильной печи ДСП-12. В результате испытаний было достигнуто сокращение времени расплавления шихты и существенное уменьшение количества поломок электродов, что стимулировало дальнейшее внедрение этого эффективного приема и на другой ДСП-12 в условиях ПАО НКМЗ.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зараковский Г. М. Закономерности функционирования эргатических систем / Г. М. Зараковский, В. В. Павлов. – М. : Радио и связь, 1987. – 232 с.
2. Цыганаиш В. Е. Анализ и решение задачи выбора предпочтительной инициативы при управлении мощной электротермической установкой. / В. Е. Цыганаиш – Искусственный интеллект. – 2010. – № 2. – С. 164–168.
3. Геращенко Е. И. Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. / Е. И. Геращенко, С. М. Геращенко. – М. : Наука, 1975. – 296 с.
4. Попов Е. П. Разделение управляемого процесса по частотам при приближенном исследовании нелинейных систем. / Е. П. Попов, Техническая кибернетика. – 1967. – № 5.
5. Цыганаиш В. Е. Системный анализ энергетических преобразований в технологической системе / В. Е. Цыганаиш. – Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 49–53.
6. Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование динамики электропривода механизмов / И. М. Тетельбаум, Ф. М. Шлыков. – М. : Энергия, 1970. – 192 с.
7. Кизилов В. У. К вопросу о физическом смысле «реактивного тока» и «реактивной мощности». // В. У. Кизилов – Вестник НТУ ХПИ. – Харьков, 2002. – № 9. – Т. 3. – С. 44–50.
8. Жемеров Г. Г. Теория мощности Фризе и современные теории мощности. / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина – Електротехніка і Електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 63–65.