

ЭНЕРГЕТИКА

Г. П. КУМСИАНЯНИ

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ БЛОКОВ
 ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
 СИСТЕМАХ

Исследование статической устойчивости сколь угодно сложной энергетической системы не представляет никаких принципиальных затруднений. Однако в инженерных расчетах встречаются трудности, вытекающие из необходимости оперировать с характеристическими определителями очень высоких порядков. Это обстоятельство приводит к тому, что обычные методы теории регулирования не дают возможности получить удобообозримый результат и приводят к необходимости выполнения громоздких вычислений.

Исследование устойчивости в энергетических системах можно существенно упростить расчленением исходной системы обыкновенных дифференциальных уравнений на более простые замкнутые уравнения. При этом применение общих методов к совокупности таких более простых уравнений всегда значительно проще, чем применение их к исходной сложной системе. Частным случаем такого подхода является общепринятое рассмотрение динамики энергетических систем по частям, при котором процессы, происходящие в котлах и в гидротехнических сооружениях, турбинах, генераторах и электрических сетях рассматриваются изолированно друг от друга. Ранее использовавшееся расчленение энергетической системы основывалось на грубых и не всегда физически ясных предположениях, которые математически эквивалентны случаю, когда отсутствуют какие бы то ни было взаимосвязи между указанными процессами.

Автор, пользуясь приемом, который в математическом отношении является одним из методов малого параметра, расчленяет общее уравнение на отдельные замкнутые уравнения низких порядков, в общем случае (при котором существенны взаимодействия между явлениями) ранее рассматривавшимися изолированно.

Примером такого взаимодействия могут служить энергетические блоки тепловых электростанций, так как потышенные параметры пара и единство системы регулирования, определяемое блочной компоновкой, приводят к существенным взаимодействиям между динамическими процессами в котле, турбине и генераторе блочного агрегата.

1. Деление линейных уравнений динамической системы блока барабанный котел-турбина

Линейные уравнения [1] динамической системы блока барабанный котел-турбина с нерегулируемым генератором, включенным на изолированного потребителя, приводятся в форме записи, удобной для последующих исследований.

Уравнение толки

$$(T_1 p + 1) \ddot{\psi} + \dot{\psi} + p_0 = 0.$$

Уравнение процессов в кипящей зоне

$$(T_k p + 1) p_{кз} - p_n - C_{34} \ddot{\psi} = 0.$$

Уравнение первичного пароперегревателя

$$(T_n p + 1) p_n - C_{35} p_{кз} - (1 - C_{35}) p_0 = 0.$$

Уравнение трубопроводов свежего пара

$$p_0 - C_{66} p_n + (1 - C_{66}) \frac{\dot{\psi}}{T_s p + 1} + C_{67} p_{пп} = 0. \quad (1)$$

Уравнение промперегревателя (промежуточного перегревателя)

$$(T_{пп} p + 1) p_{пп} - C_{67} p_0 - C_{76} \frac{\dot{\psi}}{T_s p + 1} = 0.$$

Уравнение вращения турбины

$$\left(T_s p + x_{из} + \frac{C_{34}}{T_k p + 1} \right) \ddot{\psi} - C_{87} p_{пп} - C_{89} p_0 = 0,$$

где $p_{кз}$, p_n , p_0 , $p_{пп}$ — изменения давления пара в относительных единицах в паровых частях соответственно кипящей зоны, первичного перегревателя, трубопроводов свежего пара, промежуточного пароперегревателя;

$\ddot{\psi}$, $\dot{\psi}$ — соответственно изменения относительного расхода пара и относительной скорости вращения;

C — параметры статических связей;

T — постоянные времени соответствующих элементов:

T_1 — постоянная времени сервомотора клапанов турбины, T_s — постоянная инерции агрегата;

$x_{из}$ — коэффициент саморегулирования при работе агрегата на изолированного потребителя.

Возможность разделения процессов связана с тем, что постоянные в системе возмущенного движения и, в первую очередь, постоянные времени имеют различный порядок. T_1 , $T_{кз}$ — порядка 40—50 сек; $T_{пп}$, T_s — порядка 15—20 сек; T_n , T_k — порядка 0,4—1 сек, параметры статических связей в данном примере одного порядка.

Принимая τ порядки десятков секунд за эталоны сравнения постоянных времени и C порядки единиц за эталоны сравнения коэффициентов, а затем, выражая все параметры в исходных уравнениях (1) с помощью малого параметра $m=0,1$ и эталонов сравнения, запишем характеристический определитель системы уравнений (1) в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} \xi & p_{\text{кз}} & p_{\text{н}} & p_0 & p_{\text{нн}} & \psi \\ \tau_{\text{н}} p + 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & m^2 \tau_{\text{н}} p + 1 \\ -m C_{21} & \tau_{\text{кз}} p + 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m^2 C_{55} & m^2 \tau_{\text{н}} p + 1 & m^2 (1 - C_{55}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{66} & 1 & m^2 C_{66} & m^2 (1 - C_{66}) \\ 0 & 0 & 0 & -m C_{26} & m \tau_{\text{нн}} p + 1 & m C_{26} \\ 0 & 0 & 0 & -m^2 C_{56} & -m^2 C_{57} (m \tau_{\text{н}} p + \tau_{\text{нн}}) \cdot \\ & & & & & \cdot (m^2 \tau_{\text{н}} p + 1) + \\ & & & & & + m^2 C_{58} \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

Воспользуемся результатами работы [2, 3]. При m малом часть корней уравнения (1) должна быть близка к корням уравнений, получающихся из (2) при $m=0$. Поэтому получаем замкнутые уравнения топки и кипящей зоны в следующем виде:

$$T_1 p + 1 = 0, \quad (3)$$

$$T_2 p + 1 = 0. \quad (4)$$

Чтобы отыскать следующую часть корней характеристического определителя (2), положим в нем $p = \frac{q}{m}$. Освобождаясь от отрицательных степеней m , отбрасывая члены, содержащие малый параметр в первой степени и выше, получим уравнения, соответствующие паровой турбине.

$$(T_{\text{нн}} p + 1) (T_1 p + \tau_{\text{кз}} + C_{62}) + C_{67} C_{70} = 0, \quad (5)$$

$$T_{\text{н}} p + 1 + C_{56} (1 - C_{55}) = 0. \quad (6)$$

Наконец, чтобы получить уравнения, корни которого близки к остальным корням системы уравнений (1), положим в (2) $p = S m^2$. Освобождаясь от отрицательных степеней m и отбрасывая члены, содержащие m в первой степени и выше получим уравнение динамической системы регулятора скорости

$$T_3 p + 1 = 0. \quad (7)$$

Таким образом уравнение шестого порядка, описывающее переходные процессы в динамической системе барабанный котел—турбина

при работе на изолированного потребителя, приближенно распадается на уравнения, каждое из которых не выше второго порядка.

Заметим, что в уравнение, соответствующее динамической системе паровой турбины (5), не вошли параметры котла и регулятора скорости. Это означает, что в данном случае применимо общепринятое рассмотрение динамики паровой турбины при постоянстве давления в паропроводах свежего пара и идеальном регуляторе скорости. Рассмотренная блочная компоновка агрегата по характеру динамических связей близка к схеме с поперечными связями, при которой паровые турбины работают на общую котельную.

2. Деление линейных уравнений динамической системы блока прямоточный котел-турбина

Блок котел-турбина является единым регулируемым объектом и в любой схеме регулирования отклонение регулируемого параметра должно быть передано в первую очередь генерирующему элементу — котлу. Однако для современных котлов с временами разгона порядка 1,5—3,0 мин не может быть получен сколько-нибудь удовлетворительный переходный процесс, без использования энергии, запасенной в котле. Использовать энергию возможно прежде всего с помощью клапанов турбины. Это приводит к системе регулирования со смешанным управлением блоком, при котором осуществляется прямая передача команды котлу и турбине одновременно.

В данном примере рассматривается смешанное регулирование блока по давлению свежего пара и скорости вращения турбины.

Линеаризованные уравнения работы блока прямоточный котел-турбина на шине бесконечной мощности [4], записанные в форме удобной для последующих преобразований, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} & [T_{nr} T_p p^2 + (T_{nr} + T_T) p + 1] \dot{\varepsilon} + T_d p \dot{\delta} + p_0 = 0, \\ & \frac{T_{k3} T_{n3} p^2 + (T_{k3} + T_{n3} + C_{23} T_{12}) p + 1}{T_{n3} p + 1} p_{k3} - p_k - C_{11} \dot{\varepsilon} = 0, \\ & (T_n p + 1) p_n - C_{22} p_{k3} - (1 - C_{22}) p_0 = 0, \\ & (T_0 p + 1) p_0 - (1 - C_{20}) p_n + \frac{C_{20} T_d p \dot{\delta}}{T_s p + 1} = 0, \\ & [T_{kn} T_{nn} p^2 + (T_{kn} + T_{nn}) p + C_{17}] p_{nn} - C_{17} p_0 - \frac{C_{17} T_d p \dot{\delta}}{T_s p + 1} = 0, \\ & (T_d T_d p^2 + T_{dx} p + S_n) \dot{\delta} - \frac{\Delta T_{k3} p + 1}{T_{dx} p + 1} p_{nn} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где δ — взаимный угол между вектором э.д.с. генератора и напряжением приемной системы; T_1 , T_{n1} — соответственно постоянные времени топки и процессов парообразования; T_{12} , T_{13} , T_{n3} — постоянные времени, характеризующие аккумуляцию пара в кипящей зоне; T_n , T_0 , T_{kn} ,

$T_{\text{вт}}$ — постоянные времени паровых объемов соответственно первичного теплообогревателя, паропроводов свежего пара, регулирующей ступени турбины и промпрегревателя; T_N — постоянная времени, характеризующая запаздывание при трансформации давления пара в мощность на валу турбины.

Надо отметить, что в рассматриваемом случае T_r , T_{43} — порядка 30—40 сек; T_a , $T_{\text{пр}}$ — порядка 10—15 сек; $T_{\text{па}}$, $T_{\text{мз}}$, T_n , $T_{\text{по}}$ — порядка 3—6 сек; T_0 — порядка 1 сек; $T_{\text{мк}}$, T_s — порядка 0,3—0,6 сек; T_N — порядка 0,1 сек.

Характеристический определитель двенадцатого порядка системы уравнений (8) расщеленяется методом малого параметра на замкнутые определители отдельных движений, каждый из которых не выше пятого порядка.

Определитель, описывающий медленное движение, имеет вид:

$$\begin{vmatrix} m \tau_{\text{пр}} \tau_r p^2 + (m \tau_{\text{пр}} + \tau_r) p + 1 & 0 & 0 & 1 \\ -m \tau_{43} C_{34} & m \tau_{43} C_{34} p + 1 & -(1 - m \tau_{43} C_{34}) & 0 \\ 0 & -C_{35} & m \tau_{\text{па}} p + C_{66} & C_{33} \\ 0 & 0 & -(1 - m \tau_{\text{па}} C_{66}) & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

Определитель (9) соответствует котловым процессам. Раскрывая его и отбрасывая члены, содержащие малый параметр в степени большей, чем 1/2, получим уравнение второго порядка

$$T_r T_s p^2 + (T_s + T_r) p + A = 0, \quad \text{где} \quad T_s = \frac{C_{34} T_{43} (C_{66} + C_{33}) + T_n + C_{66} T_{\text{пр}}}{C_{66} (1 - C_{33}) + C_{35} C_{34}}, \quad (10)$$

$$A = 1 + \frac{C_{34} C_{33}}{C_{66} (1 - C_{33}) + C_{35} C_{34}} \approx 1.$$

Здесь T_s — выражает эквивалентное влияние параметров парового тракта котла и турбины на динамику котельных процессов.

Динамической системе парообразования соответствует уравнение второго порядка, в которое вошли параметры парового тракта блока. Динамической системе паровой турбины соответствует характеристический определитель процессов на порядок выше предыдущих:

$$\left((m \tau_{\text{пр}} q + m \tau_{\text{пр}} + m \tau_r) \left[m \tau_{\text{мз}} \tau_{\text{па}} q^2 + (m \tau_{\text{мз}} + m \tau_{\text{па}} + C_{34} \tau_{43}) q + m \tau_{\text{па}} \right] \times \right. \\ \left. \times \begin{vmatrix} \tau_{\text{па}} q + m \tau_{\text{па}} & \tau_{\text{па}} q + C_{33} & 0 & m C_{66} \tau_{\text{па}} p \\ -m \tau_{\text{па}} (1 - m \tau_{\text{па}} C_{66}) & m \tau_{\text{па}} q + 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} + \right.$$

$$\begin{vmatrix}
 0 & C_{11} & m\tau_{11}\tau_{22}q^2 + (m\tau_{11} - \tau_{22})q + C_{12} & mC_{11}\tau_{11}p \\
 0 & 0 & -(m\tau_{11}\tau_{22}q + 1) & s_u(m\tau_{11}q + 1) \\
 + m\tau_{11}\tau_{22}qC_{12}(\tau_{22}q + 1)(\tau_{11}q + C_{11}) & s_u & 0 &
 \end{vmatrix} + \dots$$

$$+ m\tau_{11}\tau_{22}qC_{12}(\tau_{22}q + 1)(\tau_{11}q + C_{11})s_u = 0 \quad (11)$$

Если выражение (11) полностью раскрыть и отбросить члены, содержащие малый параметр в степени выше первой, то получим уравнение пятого порядка, соответствующее динамике паровой турбины.

Однако, для дальнейших рассуждений достаточно иметь только определители отдельных движений. Поэтому, чтобы не усложнять изложение, последние не раскрываем.

Из выражения (11) следует, что в уравнение, соответствующее динамическим процессам в паровой турбине, кроме параметров самой турбины, пойдут постоянные времени элементов котла и регулятора скорости, несмотря на то, что последние образуют отдельные движения, описываемые отдельными замкнутыми уравнениями.

Характеристический определитель электромеханических процессов имеет вид:

$$\begin{vmatrix}
 (\tau_{11}r + 1)(m\tau_{11}r - 1) & C_{11}r \\
 (\tau_{22}r + m\tau_{11}) & m\tau_{11}\tau_{22}r \\
 (\tau_{22}r + 1)(m\tau_{11}\tau_{22}r^2 + \dots) & s_u(m\tau_{11}r + 1)
 \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

Если раскрыть этот определитель, отбрасывая члены, содержащие малый параметр в степени равной и выше первой, получим уравнение пятого порядка, выражающее взаимосвязи между электромеханическими процессами, паровой турбиной и регулятором скорости. Для синхронизирующих моментов S_2 порядка единиц, определитель (12) получается для случая отсутствия зоны нечувствительности у регуляторов скорости при статизме по частоте порядка 1—2%.

При статизме порядка 6—10% и S_2 порядка единиц определитель (12) распадается на следующие уравнения электромеханических процессов и регулятора скорости

$$T_1 T_2 p^2 + T_1 x p + S_2 = 0, \quad (13)$$

$$T_2 p + 1 = 0. \quad (14)$$

При расчетах устойчивости электромеханических процессов для S_2 порядка десятых долей единицы даже при наличии зоны нечувствительности в регуляторе скорости следует пользоваться выражением (12), которое является более общим, чем (13).

Итак характеристический определитель исследуемой системы двенадцатого порядка приближенно распадается на отдельные замкнутые

уравнения, каждое из которых не выше пятого порядка. Дальнейший анализ устойчивости исходной системы выполняется по совокупности замкнутых уравнений отдельных движений.

Применение методов теории регулирования (Пурвица, Д-разбиения и т. д.) к уравнениям пятого порядка не представляет никаких затруднений, в то время как применение указанных методов к уравнениям двенадцатого порядка связано с громоздкими аналитическими выкладками. Предложенный подход особенно эффективен при исследовании динамики блоков тепловых электростанций, так как позволяет существенно упростить расчеты устойчивости и выявить влияние указанных взаимодействий на регулирование рассматриваемых объектов.

ВНИИЭ

Поступило 9.XII 1963

Կ. Պ. ԿՈՒՄՍՈՒՇՎԻԼԻ

ԴՆԵՐԳՆԱԿԱՆ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ԶԵՐՍԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ԿԱՆՈՆԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա. մ փ ո փ ո լ մ

Բարդ էներգետիկական սխեմաների ստատիկական կայունության առանձնահատկությունները սկզբունքորեն ոչ մի գծավորության չեն հանդիպում: Սակայն նրանց ինժեներական հաշվարկները կապված են որոշակի բարձր կարգի հավասարումների լուծման հետ: Այդ պատճառով ժամանակակից կանոնավորման տեխնիկան զործնական կիրառությունները պահանջում են մի շարք բարդ ու մեծածախ հաշվարկներ:

Ըներգոսխեսններն կայունության առանձնահատկությունները կարելի է էական պարզեցնել, ընդհանուր հավասարումների բարդ սխեման մի քանի ավելի պարզ հավասարումների փոխ սխեմաների վերածելով:

Հետադրական ալի մեթոդը հնարավորություն է տալիս էներգոսխեսնի ընդհանուր դինամիկան դիտել բոլոր նրա առանձին մասերի, ընդ որում կայանի լիմային կախալում, սուրբինում, դեներատորում և էլեկտրական ջանքում աղի ունեցող պրոցեսները կարելի է դիտել որպես միմյանցից տնկել:

Հղվածում օդադործելով մոտքը պարամետրի մեթոդը, բարձր կարգի հավասարումների սխեման ապահովողովում է ցածր կարգի հավասարումների մի քանի փոխ սխեմաների:

Առաջված ավելի պարզ հավասարումների սխեմաները միմյանց հետ կապվում են ֆիդիլական որոշակի իմաստ ունեցող համապատասխան պարամետրերի միջոցով և հնարավորություն է տալիս մոտեցիկում որոշելու ալի կամ ալի տնկում պրոցեսի աղիեցությունը սխեման կանոնավորման վրա:

Մշակված ալի մեթոդը առանձնապես արդյունավետ է ջերմային էլեկտրակայանների դինամիկան սխեմաների համար, նա թույլ է տալիս էական պարզեցնել հաշվման տեխնիկան և բացահայտել առանձին պրոցեսները աղիեցությունը սխեման կանոնավորման վրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. К. Богданов. Некоторые вопросы динамики регулирования блоков котел-турбина. Энергомашиностроение № 1, М., 1962.
2. Н. А. Картвелишвили. Устойчивость в малом динамических систем, содержащих малые параметры, Известия АН СССР, ОТН, № 9, 1957.
3. Н. А. Картвелишвили. Влияние взаимодействия гидравлических, механических и электрических процессов на устойчивость работы электростанций. Известия АН СССР, ОТН, № 2, 1958.
4. В. Б. Рубин. Регулирование мощности блоков прямоточный котел-турбина. Автореферат диссертации, МЭИ, 1962.