

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

К. Х. ОВСЕПЯН, А. С. МЕЛКОНЯН

УЧЕТ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ
РЕСИНХРОНИЗАЦИИ ГИДРОАГРЕГАТОВ

В ряде практически важных случаев неустановившийся режим гидрогенератора может протекать при больших отклонениях скорости вращения от синхронной. К таким режимам относятся работа генератора в асинхронном режиме, процессы ресинхронизации, самосинхронизации и т. д.

При исследовании этих режимов из-за больших отклонений скорости вращения иногда необходимо учитывать характеристики гидротурбин и трубопровода ГЭС, так как влияние их на протекание переходного процесса более всего будет сказываться именно при этих режимах. Режим асинхронного хода многие годы полагали недопустимым, так как считалось, что при больших скольжениях в роторе будут иметь место потери, в несколько раз превышающие нормальные потери на возбуждение, а момент, развиваемый синхронным генератором, при асинхронном режиме невелик.

Результаты экспериментально-теоретического изучения на большом количестве генераторов, выполненные И. А. Сыромятниковым, И. М. Марковичем и Л. Г. Мамиконянцем показали, что для подавляющего числа синхронных машин кратковременный асинхронный режим не представляет опасности.

В связи с этим оказалось возможным восстанавливать нормальную работу системы, оставляя вышедший из синхронизма генератор на некоторое время в асинхронном режиме. В этом смысле можно говорить, что система сохраняет результирующую устойчивость, поскольку нарушения энергоснабжения не происходит. Однако, асинхронный ход не является для оборудования системы нормальным режимом и не должен осуществляться без анализа и выявления его допустимости. Допуская работу генератора в режиме асинхронного хода, возникшего из-за потери возбуждения или в результате нарушения устойчивости, и затем восстанавливая синхронную работу, электрические системы получают возможность уменьшить количество аварийной недодачи электроэнергии [1].

Действительно, если после выпадения из синхронизма генератор выключить из сети, а затем вновь синхронизировать его, то в течение 20—40 мин. выпавший из синхронизма генератор не будет выдавать 3. ТН., № 6

энергию в систему. Если же выпавший из синхронизма генератор не отключается от сети и кратковременно допускается работа в асинхронном режиме, то полного перерыва в выдаче электроэнергии не будет, хотя во время асинхронного хода мощность, выдаваемая генератором, несколько уменьшится. При увеличении скорости вращения агрегата автоматические регуляторы скорости вступают в действие и уменьшают открытие награвляющего аппарата. Величина нагрузки, при котором наступит новый установившийся режим, будет зависеть от параметров регулятора скорости, характеристики турбины и характеристики асинхронного момента генератора.

Среднее значение относительного электромагнитного момента при работе генератора в асинхронном режиме без возбуждения равно [1].

$$M_{\text{ас}} = \frac{n^2}{2} \left[\frac{x_d - x_d'}{x_d x_d'} \frac{ST_d}{1 + (ST_d)^2} + \frac{x_d' - x_d''}{x_d' x_d''} \frac{ST_d'}{1 + (ST_d')^2} + \frac{x_d'' - x_d'''}{x_d'' x_d'''} \frac{ST_d''}{1 + (ST_d'')^2} \right] \quad (1)$$

Первый член этого уравнения обусловлен изменением общего потока контуров ротора в продольной оси, второй член — изменением потоков рассеяния между контурами ротора по продольной оси, а третий член обусловлен токами в контуре ротора в поперечной оси. При исследовании ресинхронизации агрегата весь процесс разбивается на три этапа. Первый этап — с момента начала переходного процесса до выпадения из синхронизма. Второй этап — при котором скорость вращения агрегата, пройдя после сброса нагрузки через свое максимальное значение, понизится в связи с действием регулятора скорости до величины, близкой к первоначальной. Третий этап — процесс обратного втягивания в синхронизм.

Для расчета процесса ресинхронизации и наладки ресинхронизаторов очень важно знать поведение агрегата при так называемом втором этапе, так как именно при этом выявляется влияние параметров гидромеханической части.

В статье предлагается формула для расчета изменения скольжения гидротурбегата при ресинхронизации с учетом характеристик гидротурбины, автоматического регулятора скорости жесткого трубопровода и характеристик асинхронного момента гидротурбины.

В общем случае изменение скорости гидротурбегата при асинхронном ходе определяется движущим моментом турбины, средним асинхронным моментом и собственным электромагнитным моментом

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - (M_{\text{ас}} + M_{\text{эл}}). \quad (2)$$

Момент движущих сил гидротурбины зависит от угла поворота скорости вращения, положения регулирующего органа и величины напора

$$M_t = f(\omega, \alpha, H).$$

Собственную электромагнитную мощность генератора принимаем зависящей от частоты, т. е. от скорости вращения

$$P_{11} = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} = K \Delta \omega$$

чему будет соответствовать

$$M_{11} = \text{const.}$$

Характеристики асинхронного момента, как видно из (1), нелинейны и поэтому решение уравнения в общем невозможно.

При асинхронном ходе, средний асинхронный момент гидрогенератора будет в основном обусловлен изменением потоков рассеяния между контурами по продольной оси, так как составляющая асинхронного момента, связанная с изменением общего потока контура ротора, имеет максимум при малых скольжениях (0,5–0,7%) и с увеличением скольжения быстро уменьшается, составляя 3–4% при $M_{ас\max}$.

Полученные характеристики асинхронного момента ряда гидрогенераторов с различными параметрами показывают, что максимумы этих характеристик имеют место при скольжениях 8–17% (в среднем 10%).

Это дает возможность при исследовании влияния гидравлических параметров на режим ресинхронизации средний асинхронный момент учесть только по второму члену уравнения (1) и записать уравнение момента в линейризованном виде

$$M_{ас} = K_{ас} \Delta \omega,$$

где $K_{ас}$ — определяется по восходящей ветви характеристики асинхронного момента (рис. 1). Такое упрощение можно считать допустимым по следующим соображениям. При полном сбросе нагрузки до-

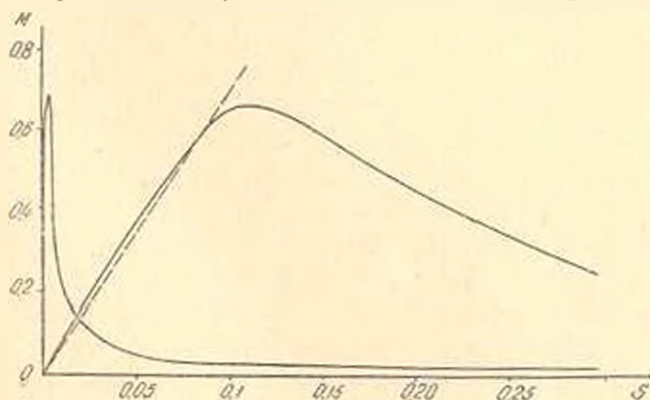


Рис. 1.

пускается временная неравномерность в пределах 30%. При режимах ресинхронизации из-за наличия дополнительных моментов сопротивления $M_{ас}$ и M_{11} скольжение гидрогенератора будет гораздо меньше и значение s по характеристике асинхронного момента не будет выходить за линейный участок. В большинстве практических случаев

погрешности, обусловленные приближенным выражением асинхронного момента, не будут иметь существенного значения.

При линеаризованной характеристике асинхронного момента уравнение агрегата можно записать в виде [2]

$$T_s p S - b S - z = a + \frac{b_0}{p}, \quad (3)$$

где S , a , b соответственно относительные изменения оборотов, давления и открытия направляющего аппарата,

b_0 — коэффициент саморавновивания,

p — оператор дифференцирования.

Уравнение автоматического регулятора скорости с изодромом [2]

$$z = - \frac{S (T_i p + 1)}{T_s T_i \varepsilon p^2 + (T_s + T_i \varepsilon) \sigma p + \varepsilon}, \quad (4)$$

где T_i — постоянная изодрома,

ε — остаточная неравномерность,

Уравнение жесткого трубопровода

$$T_r k p u = z, \quad (5)$$

где T_r — постоянная трубопровода,

k — наклон расходной характеристики.

Совместным решением уравнений агрегата, автоматического регулятора скорости и жесткого трубопровода находим операторное выражение для определения изменения скорости

$$S(p) = \frac{a \varepsilon [T_s T_i \sigma p^2 + (T_s + T_i \varepsilon) \varepsilon + T_i \varepsilon |p + \varepsilon]}{\frac{r}{3} p^3 + m p^2 + n p + (1 - b_0 \varepsilon) p}, \quad (6)$$

где

$$r = 3 T_s T_r T_i \varepsilon,$$

$$m = T_a \sigma (T_s + T_i \varepsilon) - T_i (T_s b_0 \varepsilon + T_r \varepsilon k) + T_a T_i \varepsilon,$$

$$n = T_i (1 - b_0 \varepsilon) \sigma - (T_s b_0 \varepsilon + T_r \varepsilon k) + (T_a - T_i b_0) \varepsilon.$$

Характеристическое уравнение для (6) равно

$$\frac{r}{3} p^3 + m p^2 + n p + (1 - b_0 \varepsilon) p = 0. \quad (7)$$

Численное значение коэффициента самовыравнивания при асинхронном ходе доходит до 6, а иногда и более (вместо 1,0–1,5 при изолированной работе гидроагрегата), так как наклон характеристик асинхронного момента гораздо круче частотных характеристик нагрузок. При этом дискриминант кубического уравнения меньше нуля, и все три корня действительны.

Для рассматриваемого случая корни характеристического уравнения:

$$p_1 = \frac{1}{r} (2 \cos \varphi \sqrt{|r n - m^2 - m|},$$

$$p_2 = \frac{1}{r} (2 \cos (\varphi - 120) \sqrt{|rn - m^2|} - m), \quad (8)$$

$$p_3 = \frac{1}{r} (2 \cos (\varphi + 120) \sqrt{|rn - m^2|} - m),$$

где

$$\cos 3 \varphi = \frac{m (2m^2 - 3rn) + 3r^2 (1 - b_2)}{2rn - m^2}.$$

Вычисление функции $S(t)$ находится по формуле разложения после подстановки значений корней характеристического уравнения и некоторых упрощений

$$\begin{aligned} S(t) = & \frac{a \lambda_2}{1 - b_2} + \frac{T_1 T_2 (2 \cos \varphi \sqrt{|rn - m^2|} - m + r(T_1 + T_2))}{(rn - m^2) (4 \cos^2 \varphi + 1)} \cdot \\ & \cdot \exp\left(-\frac{2 \cos \varphi \sqrt{|rn - m^2|} - m}{r} t\right) + \\ & + \frac{T_1 T_2 (2 \cos (\varphi - 120) \sqrt{|rn - m^2|} - m) + r(T_1 + T_2)}{(rn - m^2) (4 \cos^2 (\varphi - 120) + 1)} \cdot \\ & \cdot \exp\left(-\frac{2 \cos (\varphi - 120) \sqrt{|rn - m^2|} - m}{r} t\right) + \\ & + \left(\frac{T_1 T_2 (2 \cos (\varphi + 120) \sqrt{|rn - m^2|} - m) + r(T_1 + T_2)}{(rn - m^2) (4 \cos^2 (\varphi + 120) + 1)}\right) \cdot \\ & \cdot \exp\left(-\frac{2 \cos (\varphi + 120) \sqrt{|rn - m^2|} - m}{r} t\right). \quad (9) \end{aligned}$$

Полученная формула для расчета изменения скорости гидроагрегата в процессе ресинхронизации удовлетворяет граничным условиям

$$\text{при } t = 0 \quad S(t) = 0,$$

$$t = \infty \quad S(t) = \frac{a \lambda_2}{1 - b_2} \quad (10)$$

Из последнего выражения видно, что на установившееся значение отклонения угловой скорости или скольжения могут влиять существенно остаточная неравномерность автоматического регулятора скорости λ и коэффициент сдвигания генератора b_2 . С целью выяснения влияния гибкой обратной связи по формуле (9) выполнены расчеты.

Расчеты и анализ результатов показали, что продолжительность переходного процесса определяется в основном первым корнем p_1 характеристического уравнения (7), который в несколько раз меньше p_2 и p_3 .

По постоянной затухания T_1 можно оценить влияние отдельных параметров и рассчитать продолжительность переходного процесса по формуле:

$$T_1 = \frac{1}{p_1} = \frac{r}{2 \cos \varphi \sqrt{|rn - m^2|} - m} \quad (11)$$

На рис. 2 показаны результаты расчета асинхронного хода гидроагрегата по параметрам динамической модели Института водных проблем АН Армянской ССР при $T_1 = 0; 2; 4; 6$:

Как видно (рис. 2) в начальной стадии переходного процесса, и в частности, при максимальном отклонении скорости, влияние гибкой

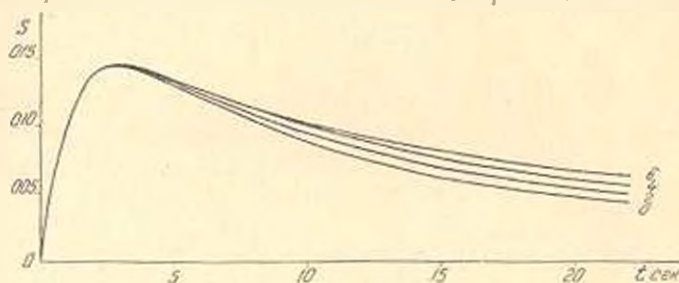


Рис. 2.

обратной связи ничтожно, так как расчетные кривые $S = f(t)$ при различных значениях постоянного времени T_1 практически не отличаются от кривой, рассчитанной при $T_1 = 0$. Это обстоятельство дает возможность для практических расчетов наряду с формулой (9) применять простую формулу, полученную в предположении отсутствия гибкой обратной связи. В этом случае характеристическое уравнение становится второй степени, и его корни будут равны:

$$\begin{aligned} p_1 &= -\alpha + \beta, \\ p_2 &= -\alpha - \beta, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\alpha = \frac{T_a \sigma - T_1 \sigma \theta - T_1 \tau k}{2 T_a T_1 \sigma},$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1 - \theta \varepsilon}{T_a T_1 \sigma} - \alpha^2}.$$

Формула для расчета скольжения гидроагрегата при асинхронном ходе будет иметь вид

$$S = \frac{\alpha k \varepsilon}{1 - \theta \varepsilon} \left[1 + (F \operatorname{sh} \beta t - c h \beta t) e^{-\alpha t} \right], \quad (13)$$

где

$$F = \frac{1}{\beta} \left(\frac{1 - \theta \varepsilon}{T_a \varepsilon} - \alpha \right).$$

В этом случае продолжительность переходного процесса определяется по значению α , которая является обратной величиной постоянного времени

$$T_2 = \frac{1}{\alpha} = \frac{2 T_a T_1 \sigma}{T_a \sigma - T_1 \sigma \theta - T_1 \tau k}. \quad (14)$$

Ниже приведены результаты расчета измерения скорости гидроагрегата ДзориГЭС при выпадении из синхронизма. Далее расчетные дан-

ные сопоставлены с результатами экспериментов, проведенных на этой же станции.

Основные данные агрегата:

$$P = 7400 \text{ кВт}; GD = 89 \text{ т.м}^2;$$

рабочее колесо $P0.60$;

$$T_0 = 6 \text{ сек}; T_1 = 0,85 \text{ сек}; T_2 = 3 \text{ сек}; T_3 = 3,2 \text{ сек}; T_4 = 0,8 \text{ сек};$$

$$T_d = 0,029; x_d = 0,56; x_1 = 0,17; x_4 = 0,10.$$

По этим данным определены

$$k_1 = 172 \text{ км сек}; k_2 = 50 \text{ км м.м.}; k_a = 2750 \text{ кг сек};$$

$$k_4 = 1,2 \text{ км}; \eta = -5.$$

Переходный процесс рассчитан по формуле (9), а также по упрощенной формуле (13) без учета действия гибкой обратной связи. На рис. 3 показаны кривые переходного процесса по результатам рас-

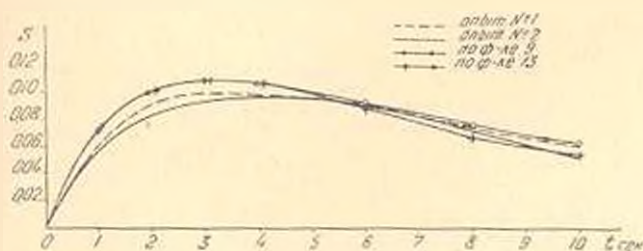


Рис. 3.

чету и по данным экспериментов. В заключение отметим, что предлагаемые формулы позволяют оценить влияние параметров трубопроводов, гидротурбины и автоматического регулятора скорости на переходный процесс. При расчете режимов ресинхронизации максимальное отклонение скорости $S_{\max}$ можно, с достаточной для практики точностью, рассчитать по формуле (13).

Продолжительность переходного процесса с учетом гибкой обратной связи определяется коэффициентом затухания по формуле (11).

Институт водных проблем

АН Армянской ССР

Поступило 3.11.1961 г.

Ч. Б. ՀԱՎԱՓԱՅՆ Ա. Ս. ՄԱՇԻՆՅԱՆ

ԵՐԿՐԱՆՆԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱԹՈՒՄԸ
ՀԻՄՆԱԿՐԻՏՈՒՄՆԵՐԻ ՌԵՍԻՆԿՐՈՆԻԶԱՅԻՆ
ՀԱՇՎՈՒՆ ԲԱՐՈՒՆԱԿ

Ա մ ֆ օ ֆ օ լ լ յ

Ռեզինիւրոնիզացիայի պրոցիւր նաշիւլու և սեպինիւրոնիզացիոնիւրո գոր-
ծակցելու համար անհրաժեշտ է իմանալ հիպրոպրոցիոնի փարքը նրա աւի-
նիւրոն ընթացքում, երբ պատման արագութիւնը ափեւանալով անցնում է իր

մաքսիմալ արժեքով և տրապեզիան ափսոսմամբի կանոնադրիչի գործման հետեանքով իջնում է մինչև իր սկզբնական արժեքը:

Ենթիւս հոգիւածում ուսումնասիրւում է հիգրոսգրեզատի տախիւրան ընթացքը ռեախիւրանիդացիայի մասնանակ:

Համառակ լուծելով հիգրոսգրեզատի (3), արադուքիան ափսոսմամբի կանոնադրիչի (4) և սչ տուածդական ճնշման խողովակաշարի (5) համառուրումները ստացւում է հաշւալին (6) բանաձեք. որը տալիս է արադուքիան փոփոխութիւնը:

Անցման պրոցեսի տեղութիւնը սրւշւում է (11) բանաձեքով:

Եկ. 2-ում ցույց է տրւում տախիւրան ընթացքի հաշւման ալգլանքները Հալիական ՍՍՏ ԿՍՔ Զրաշին պրոյեկտների ինտախտուաի գինամիկ մոդելի ալլալներով. արադուքիան ափսոսմամբի կանոնադրիչի ճկուն հետադարձ կապի աուրեր հաաաաաաաա արժեքների գիւգրում:

Ինչպես երևում է ալլ նկարից անցման պրոցեսի սկզբնական շրջանում հետադարձ կապի աղղեղութիւնը ճնչին է:

Ալլ հանցումանքը հաարախրութիւն է տալիս պրալիակի հաշւումների համար տուադրիկը հաա պարզ փոխաւրա (13), որն ստացւում է ճկուն հետադարձ կապի բաղախրութիւն գիւգրում:

Հոգիւածում բերւում բանաձեքը հաարախրութիւն Են տալիս հաշւիլ հիգրոսգրեզատի արադուքիան փոփոխման ընթացքը սինխրոնիզմից գուրա բնիկնելուց հետո մինչև ռեախիւրանիդացիան և ափելի պարզ գրանարիլ հիգրոտուրիլի խողովակաշարի և արադուքիան ափսոսմամբի կանոնադրիչի աղղեղութիւնը ալլ պրոցեսի փրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Веников В. А. Электрически-механические переходные процессы в электрических системах. ГЭИ, 1958.
2. Овсепян К. Х. О расчете сбросов и набросов нагрузки при индиферантной работе гидроагрегата. Изв. АН Армянской ССР (серия т. и), № 2, 1958.