

## **ВЛИЯНИЕ ДЕМПФЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМПАКТНОГО ГИДРОАГРЕГАТА**

**А.Л. Маилян, М.А. Сагателян**

*Национальный политехнический университет Армении*

Исследовано влияние демпферной системы компактного гидроагрегата на устойчивость работы. Изучены признаки устойчивой работы и возникновения колебательного процесса синхронного гидроагрегата. Отмечены преимущества компактного гидроагрегата. Приведены возможности применения маховика в качестве внешней демпферной системы компактного гидроагрегата, а также принципиальная схема, согласно которой компактный гидроагрегат состоит из гидротурбины, мультипликатора, внешней демпферной системы, синхронного генератора, возбудителя, согласующего трансформатора, а также соединительных муфт, которые соединяют вал турбины с валом генератора жесткой связью. Рассмотрено применение внешней демпферной системы в компактном гидроагрегате. Составлено уравнение моментов синхронного гидроагрегата во время колебательного процесса с учетом асинхронного момента внешней демпферной системы для оценки влияния демпферного момента всего гидроагрегата на устойчивость. Представлена диаграмма векторов напряжения и электродвижущей силы во время колебательного процесса синхронного генератора. Даны значения коэффициентов демпфирования синхронного генератора и внешней демпферной системы. Получено уравнение моментов для синхронного гидроагрегата при наличии внешней демпферной системы. Решением дифференциального уравнения второго порядка получены постоянная времени затухания колебаний и угловая частота свободных колебаний синхронного генератора. Обосновано увеличение коэффициента демпфирования гидроагрегата, что, в свою очередь, вызывает быстрое затухание возникающих колебаний.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, колебания, устойчивость, гидроагрегат, уравнение моментов, коэффициент демпфирования, внешняя демпферная система, постоянная времени, угловая частота.

**Введение.** Демпферная обмотка имеет положительное влияние на различные режимы работы синхронного генератора (СГ), работающего на сеть большой мощности. Несмотря на это, длительное время демпферная обмотка не применялась в синхронных гидрогенераторах, что было связано с дополнительными затратами и трудностями конструктивного характера [1]. В процессе развития малой гидроэнергетики и широкого изучения несимметричных режимов работы, перенапряжений в переходных режимах, вопросов устойчивости, асинхронных

режимов и самосинхронизации применение демпферной обмотки, обеспечивающей надежную работу СГ в энергосистеме, получило свое действительное значение.

При изучении влияния демпферной обмотки на устойчивость гидроагрегата необходимо отдельно рассматривать действие обмотки в период нарушения статического режима. Влияние демпферной обмотки зависит от характера нарушений статического режима. При внезапном трехфазном коротком замыкании и прочих симметричных нарушениях режима работы генератора влияние демпферной обмотки в первый момент времени определяется влиянием изменения электромагнитного момента, которое воздействует на относительное движение ротора. При несимметричных коротких замыканиях на движение ротора в первый момент времени вместе с добавочным тормозным моментом влияют также демпферные моменты [1].

**Целью** настоящей работы является изучение влияния демпферной системы компактного гидроагрегата на устойчивость режимов работы.

**Методы исследования.** Признаком устойчивости системы является такое изменение мощностей и моментов, которое вынуждает систему вновь возвращаться к исходному состоянию [2]. Для оценки устойчивости СГ, включенного на шины энергосистемы, применяется второй закон Ньютона для вращающегося тела:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_T, \quad (1)$$

где  $\Omega$  – угловая скорость вращения;  $M$  – электромагнитный момент;  $M_T$  – момент на валу турбины;  $J = \frac{GD^2}{4}$  – момент инерции вращающихся частей;  $GD^2$  – маховой момент вращающихся частей [3].

При любых внезапных или резких изменениях режима работы СГ возникают свободные колебания ротора генератора. При этом ротор вращается неравномерно, и его скорость изменяется с некоторой частотой около среднего значения. Таким образом, нарушается устойчивость работы гидроагрегата. Частота свободных колебаний синхронных машин обычно составляет 0.5...2 Гц. В синхронных генераторах успокоение колебаний индуктора производится с помощью демпферного момента, создаваемого демпферной обмоткой машины [4,5].

Согласно [6], применение компактного гидроагрегата уменьшает габаритные размеры комплекса, что особенно рентабельно при создании малых гидроэлектростанций (МГЭС) в горных районах. При уменьшении массогабаритных размеров гидрогенератора необходимый минимальный маховой момент обеспечивается с помощью маховика. Обеспечение необходимого махового момента СГ позволяет повысить устойчивую работу гидроагрегата МГЭС.

Согласно [6,7], в компактном гидроагрегате (рис. 1) маховик можно также использовать в качестве внешней демпферной системы (ВДС), установив на нем

статор асинхронной машины. Согласующий трансформатор (СТ) может быть применен в том случае, если разработанная ВДС отличается по напряжению от синхронного генератора.

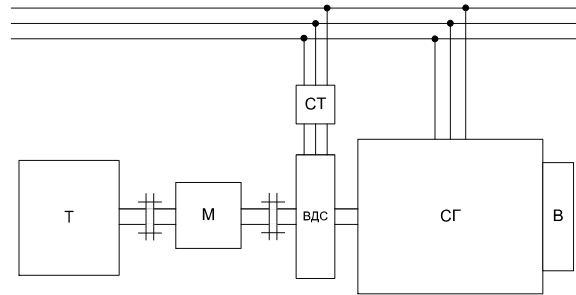


Рис. 1. Принципиальная схема компактного гидроагрегата для МГЭС:  
 Т – турбина, М – мультипликатор, ВДС – внешняя демпферная система, СГ – синхронный генератор, В – возбудитель, СТ – согласующий трансформатор

**Результаты исследования и их обсуждение.** В компактных гидроагрегатах успокоительный момент несколько больше из-за наличия внешней демпферной системы, которая работает параллельно с демпферной обмоткой СГ [7]. Для оценки влияния демпферного момента всего гидроагрегата на устойчивость составим уравнения моментов синхронного генератора при его колебаниях.

Как известно, электромагнитный момент без учета активного сопротивления статора выражается следующим равенством:

$$M = \frac{mEU}{\Omega_c x_d} \sin\theta + \frac{mU^2}{2\Omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (2)$$

где  $m$  – число фаз;  $E$  – электродвижущая сила (ЭДС);  $U$  – напряжение;  $\Omega_c$  – синхронная скорость вращения;  $\theta$  – угол нагрузки;  $x_d$  и  $x_q$  – синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям синхронного генератора.

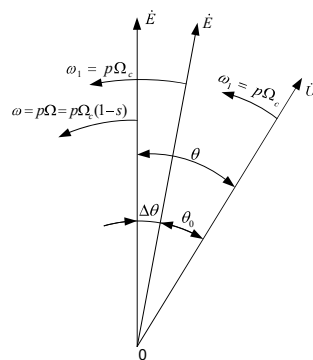


Рис. 2. Векторы напряжения и ЭДС синхронного генератора во время колебаний

Если колебания (рис. 2) совершаются около значения угла  $\theta = \theta_0$ , соответствующего состоянию равновесия, когда электромагнитный момент  $M = M_0$  уравновешивается внешним вращающим моментом, то при колебаниях имеем  $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$ , где  $\Delta\theta = f(t)$  представляет собой величину отклонения угла при колебаниях машины.

Согласно [5], имеем

$$M = M_0 + \Delta M = M_0 + M_{c.m.}\Delta\theta, \quad (3)$$

где электромагнитный момент согласно (2) при  $\theta = \theta_0$  равен

$$M_0 = \frac{mEU}{\Omega_c x_d} \sin\theta_0 + \frac{mU^2}{2\Omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta_0; \quad (4)$$

коэффициент синхронизирующей мощности:

$$M_{c.m.} = \frac{mEU}{\Omega_c x_d} \cos\theta_0 + \frac{mU^2}{2\Omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta_0. \quad (5)$$

Так как  $M_0$  уравновешивается приложенным к валу внешним моментом  $M_T$ , то достаточно учесть лишь второй член уравнения (3), который представляет собой синхронизирующий момент  $M_c$ :

$$M_c = -M_{c.m.}\Delta\theta, \quad (6)$$

Величина  $M_{c.m.}$  действительна при малых колебаниях ротора (угол  $\theta$ ), когда можно пренебречь электромагнитными переходными процессами в обмотках машины.

Инерционный вращающий момент равен

$$M_{и} = -\frac{J}{p} \frac{d^2\Delta\theta}{dt^2}, \quad (7)$$

где  $p$  – число пар полюсов.

Демпферный момент синхронного генератора  $M_{y.g.}$  при малых скольжениях  $s$ , как и всякий асинхронный момент, пропорционален скольжению. Этот момент создается от взаимодействия токов, индуцированных в демпферной обмотке и обмотке возбуждения с результирующим полем [5,8]:

$$M_{y.g.} = m_{c1}s,$$

где  $m_{c1}$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность момента.

Величина  $\Delta\theta$  изменяется вследствие изменения скольжения, и при этом  $d\Delta\theta = p\Omega_c(1-s)dt - p\Omega_c d$ , где первый член представляет собой угол поворота вектора ЭДС за время  $dt$ , а второй – угол поворота вектора напряжения за то же время:

$$M_{y.g.} = -\frac{m_{c1}}{p\Omega_c} \frac{d\Delta\theta}{dt} = -D_{m.g.} \frac{d\Delta\theta}{dt}, \quad (8)$$

где  $D_{m.g}$  – коэффициент демпфирования генератора. Согласно [4], при использовании формулы Клосса  $D_{m.g} = \frac{2}{s_{крг}}$ . Критическое скольжение  $s_{крг}$  определяется по параметрам СГ при наличии демпферной обмотки [1].

В компактном гидроагрегате демпферный момент имеет также вторую составляющую – момент ВДС (момент асинхронной машины с массивным ротором). Демпферный момент компактного гидроагрегата равен

$$M_y = M_{y.g} + M_{y.в}, \quad (9)$$

где  $M_{y.в} = m_{c2}s$  представляет собой демпферный момент ВДС.

Аналогично (8), для ВДС можно написать

$$M_{y.в} = -D_{m.в} \frac{d\Delta\theta}{dt}, \quad (10)$$

где  $D_{m.в}$  – коэффициент демпфирования ВДС гидроагрегата. Используя формулу Клосса для асинхронной машины с массивным ротором [9], получим

$$D_{m.в} = \frac{2}{s_{крв}} + 2 \frac{R_1}{R_2}, \quad (11)$$

где  $s_{крв} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}$  – критическое скольжение;  $R_1 = \sigma r_1$ ;  $R_2 = \sigma^2 r'_{20}$ ;  $X_k = \sigma(x_1 + \sigma x'_{20})$ ,  $r_1$

и  $x_1$  – соответственно активное и реактивное сопротивления обмотки статора;  $r'_{20}$  и  $x'_{20}$  – приведенные активное и реактивное сопротивления ротора при  $s=1$ ;  $\sigma$  – поправочный коэффициент.

Необходимо отметить, что электрические параметры ВДС сильно зависят от частоты перемещения материала ротора. Для определения этих параметров можно воспользоваться понятием комплексного магнитного сопротивления массивного магнитопровода, представленного в [9].

Учитывая, что внутренняя и внешняя демпферные системы связаны электрически и механически, уравнение моментов СГ компактного гидроагрегата, согласно уравнениям (4), (6), (7) и (9), имеет вид

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \Delta\theta}{dt^2} + (D_{m.g} + D_{m.в}) \frac{d\Delta\theta}{dt} + M_{c.m} \Delta\theta = 0. \quad (12)$$

Общее решение уравнения (12) представляется в виде

$$\Delta\theta = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (13)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий (первое условие –  $t = 0$ ,  $\Omega = \Omega_c$ ,  $s = 0$  и второе условие –  $t = 0$ ,  $\theta = \theta_0$ ,  $\Delta\theta = 0$ );  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – корни характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение и соответствующие корни имеют вид

$$\frac{J}{p} \lambda^2 + (D_{m.g} + D_{m.в}) \lambda + M_{c.m} = 0, \quad (14)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{p(D_{m.г} + D_{m.в})}{2J} \pm \sqrt{\frac{p^2(D_{m.г} + D_{m.в})^2}{4J^2} - \frac{pM_{с.м}}{J}}. \quad (15)$$

При синхронном гидроагрегате без ВДС в выражении (15) первый член под корнем обычно получается значительно меньше второго, и поэтому квадратный корень представляет собой мнимое число. В этом заключается условие возникновения периодического колебательного процесса. Внешняя демпферная система позволяет получить сравнительно большое значение коэффициента демпфирования компактного гидроагрегата и, соответственно, действительный корень. При действительном корне изменение  $\Delta\theta$  будет аperiodическим, что приводит к уменьшению времени колебательного процесса.

Постоянная времени затухания колебаний равна

$$T_k = \frac{2J}{p(D_{m.г} + D_{m.в})}, \quad (16)$$

а угловая частота свободных колебаний:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{pM_{с.м}}{J}}. \quad (17)$$

Согласно уравнению (16), колебания затухают тем быстрее, чем больше коэффициент демпфирования компактного гидроагрегата. Наличие ВДС приводит к уменьшению постоянной времени затухания колебаний и величины отклонения угла  $\Delta\theta$ .

### **Выводы**

1. Применение компактного гидроагрегата, имеющего внешнюю демпферную систему, повышает устойчивость работы МГЭС.
2. Колебания ротора синхронных гидроагрегатов зависят, в первую очередь, от величины демпферных коэффициентов компактного гидроагрегата.
3. Величину демпферных коэффициентов можно определить с помощью параметров синхронного генератора, имеющего демпферную обмотку, и параметров схемы замещения разработанной внешней демпферной системы.
4. Коэффициент демпфирования внешней демпферной системы вычисляется при помощи значения критического скольжения внешней демпферной системы.
5. Внешняя демпферная система может способствовать получению сравнительно большого значения коэффициента демпфирования, что, как следствие, приводит к аperiodическому изменению отклонения угла нагрузки.

## Լիտերատուրա

1. **Данилевич Я.В., Кулик Ю.А.** Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин.- М.; Л., 1962.- 192 с.
2. **Жданов П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А. Жукова.- М.: Энергия, 1979.- 456 с.
3. **Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В.** Устойчивость энергосистем: Монография. Книга 1.- СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.
4. **Манлян А.Л., Сагателян М.А.** Математическая модель колебательного процесса гидроагрегата малой гидроэлектростанции // Вестник НПУА: Сборник научных статей.- Ереван, 2017.-Часть 2.- С.695-702.
5. **Вольдек А.И.** Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений.-3-е изд., перераб.- Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
6. **Сагателян М.А.** Предпосылки разработки компактного гидроагрегата для малых гидроэлектростанций // Вестник Инж. академии Армении.-Ереван, 2018.- Т. 15, N 2.- С. 240-244.
7. Արտոնագիր № 3068 А Հիդրոագրեգատ / **Մ. Սաղաթեյան, Ա. Մայիլյան.**- 2016:
8. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов.-М.: Энергия, 1980.- 928 с.
9. **Куцевалов В.М.** Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивным ротором.- М.; Л.: Энергия, 1966.- 304 с.

*Поступила в редакцию 20.09.2018.  
Принята к опубликованию 14.12.2018.*

## ԿՈՄՊԼԿՏ ՀԻԴՐՈԱԳՐԵԳԱՏԻ ԴԵՄՊՖԵՐԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՉԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

### Ա.Լ. Մայիլյան, Մ.Ա. Սաղաթեյան

Հետազոտված է կոմպակտ հիդրոագրեգատի դեմպֆերային համակարգի ազդեցությունը աշխատանքի կայունության վրա: Բերված են սինքրոն հիդրոագրեգատի կայուն աշխատանքի և տատանողական պրոցեսի առաջացման հատկանիշները: Նշված են կոմպակտ հիդրոագրեգատի առավելությունները: Ներկայացված են թափանցիկ՝ որպես կոմպակտ հիդրոագրեգատի արտաքին դեմպֆերային համակարգի կիրառման հնարավորությունը, ինչպես նաև սկզբունքային սխեման, համաձայն որի կոմպակտ հիդրոագրեգատը բաղկացած է հիդրոտուրբինից, մուլտիպլիկատորից, արտաքին դեմպֆերային համակարգից, սինքրոն գեներատորից, գրգռիչից, համաձայնեցնող տրանսֆորմատորից, ինչպես նաև կցորդիչներից, որոնք միակցում են տուրբինի լիսեռը գեներատորի լիսեռին կոշտ կապով: Դիտարկված է կոմպակտ հիդրոագրեգատում արտաքին դեմպֆերային համակարգի կիրառությունը: Կայունության վրա ամբողջ հիդրոագրեգատի դեմպֆերային մոմենտի ազդեցության գնահատման նպատակով կազմված է սինքրոն հիդրոագրեգատի մոմենտների հավասարումը տատանողական պրոցեսի ժամանակ՝ հաշվի առնելով արտաքին դեմպֆերային համակարգի ասինքրոն մոմենտը: Ներկայացված է

լարման և էլեկտրաշարժ ուժի վեկտորների դիագրամը սինքրոն գեներատորի տատանողական պրոցեսի ժամանակ: Տրված են սինքրոն գեներատորի և արտաքին դեմպերային համակարգի դեմպերային գործակիցների արժեքները: Ստացված է արտաքին դեմպերային համակարգի առկայության դեպքում սինքրոն հիդրոագրեգատի մոմենտների հավասարումը: Երկրորդ կարգի դիֆերենցիալ հավասարման լուծման արդյունքում ստացված են տատանումների մարման ժամանակի հաստատունը և սինքրոն գեներատորի ազատ տատանումների անկյունային հաճախությունը: Հիմնավորված է հիդրոագրեգատի դեմպերային գործակցի մեծացումը և այդպիսով առաջացող տատանումների արագ մարումը:

**Առանցքային բառեր.** սինքրոն գեներատոր, տատանումներ, կայունություն, հիդրոագրեգատ, մոմենտների հավասարում, դեմպերային գործակից, արտաքին դեմպերային համակարգ, ժամանակի հաստատուն, անկյունային հաճախություն:

## THE IMPACT OF THE DAMPING SYSTEM ON THE STABILITY OF THE OPERATION MODES OF A COMPACT HYDROUNIT

A.L. Mayilyan, M.A. Saghatelyan

The impact of the damping system of the compact hydro aggregate on the operation stability is investigated. The signs of stable operation and the occurrence of the fluctuation process of the synchronous hydro aggregate are studied. The advantages of the compact hydro aggregate are mentioned. The opportunity of the flywheel usage as an external damping system for the compact hydro aggregate, as well as the principal scheme according to which the compact hydro aggregate consists of a hydro turbine, a multiplier, an external damping system, a synchronous generator, an exciter, matching transformers, as well as a coupling, connecting the shaft of the turbine with the shaft of the generator by hard connection are given. The external damping system application in compact hydro aggregate is considered. The moment equation of a synchronous hydro aggregate during the fluctuation process is made up, taking into account the induction moment of the external damping system for evaluating the whole hydro aggregate damping moment impact on the stability. The diagram of voltage and electromotive force vectors at the time of the synchronous generator fluctuation process is given. The damping coefficients of the synchronous generator and the external damping system are given. The moment equation of the hydro aggregate with the external damping winding is obtained. The fluctuation damping time constant and the angular frequency of the synchronous generator self fluctuations are obtained by solving a second order differential equation. The increase in the hydro aggregate damping coefficient and the fast damping of the occurred fluctuations are justified.

**Keywords:** synchronous generator, fluctuations, stability, hydro aggregate, moment equation, damping coefficient, external damping system, time constant, angular frequency.