

А.Л. МАИЛЯН, М.А. САГАТЕЛЯН

**РАЗРАБОТКА ДЕМПФЕРНОЙ СИСТЕМЫ С УЛУЧШЕННЫМИ
СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ГИДРОАГРЕГАТА МАЛОЙ
ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Рассматриваются вопросы необходимости и возможности применения маховика в компактном гидроагрегате. Разработана внешняя демпферная система компактного гидроагрегата и приведены способы ее реализации. Представлена возможность применения маховика в качестве внешней демпферной системы гидроагрегата. Приведена последовательность расчета параметров массивного ротора внешней демпферной системы, произведенного на базе схем замещения с использованием понятия комплексного магнитного сопротивления массивного магнитопровода при различных режимах работы. На основе разработанной методики рассчитаны механические характеристики внешней демпферной системы. Сравнение этих характеристик с экспериментальными данными показало, что максимальное расхождение составляет не более 6%.

Ключевые слова: компактный гидроагрегат, маховик, внешняя демпферная система, массивный ротор, комплексное магнитное сопротивление, методика расчета.

Введение. Развитие малых гидроэлектростанций (МГЭС) дает возможность снабжать электроэнергией отдаленные, горные, труднодоступные населенные пункты, где проведение и строительство линий электропередач практически невозможно и экономически нецелесообразно. Исходя из электроэнергетических и строймонтажных соображений, целесообразно использовать высокоскоростные мощные компактные гидроагрегаты с меньшими габаритными размерами и весом, которые также имеют низкую стоимость. Такие гидроагрегаты состоят из гидротурбины, мультипликатора, маховика и малогабаритного гидрогенератора. Компактный гидроагрегат имеет сравнительно высокую скорость вращения, при этом уменьшаются массогабаритные размеры гидроагрегата. Для правильного выбора оптимальной скорости вращения гидротурбины и ее согласования со скоростью вращения генератора используется мультипликатор. Если использовать уже существующий генератор с большей скоростью вращения (вместо проектирования нового), то правильный выбор мультипликатора является решающим в проектировании компактного гидроагрегата, так как от этого зависят эффективное технико-экономическое согласование гидротурбины и генератора, а также получение максимально возможной эффективности гидроагрегата.

При уменьшении главных размеров гидрогенератора уменьшается устойчивость работы и увеличиваются возможные отрицательные воздействия

переходных процессов на гидроагрегат. Следовательно, возникает вопрос обеспечения минимального махового момента, отсутствие которого, в свою очередь, приводит к неустойчивости системы. С этой целью в гидроагрегат устанавливается маховик, который является механическим демпфером и одновременно инерционным накопителем энергии, что повышает устойчивость всей системы.

Маховой момент маховика выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальный необходимый маховой момент гидроагрегата и устойчивую работу системы. Последняя, в свою очередь, обеспечивается путем уменьшения амплитуды его колебаний. Основным успокоителем колебаний является демпферная обмотка (внутренняя демпферная система) синхронного генератора [1-3].

Целью настоящей работы является разработка демпферной системы с улучшенными свойствами, что позволит уменьшить колебания и повысить устойчивость работы синхронного гидроагрегата малой мощности.

Постановка задачи и обоснование методики. Для улучшения режима работы синхронного генератора разработана внешняя демпферная система (ВДС) для гидроагрегата МГЭС [4], которая работает параллельно с внутренней демпферной системой [5] и создает асинхронный момент, имеющий противоположное направление движению ротора во время колебательного процесса.

Внешняя демпферная система может быть реализована тремя способами:

1. Если вращающаяся часть гидроагрегата обеспечивает необходимый минимальный маховой момент и отсутствует маховик, то ВДС реализуется установкой трехфазного статора на выходной конец вала или насаженную на нее массивную ферромагнитную полумуфту.

2. При наличии маховика спроектированный трехфазный статор устанавливается на маховик. Необходимо отметить, что при необходимости установки маховика ВДС может быть спроектирована совместно с маховиком, при котором можно обеспечить более лучшие демпферные свойства.

3. В механической цепи гидроагрегата перед синхронным генератором можно жестко установить асинхронную машину нормального исполнения с необходимыми параметрами.

Учитывая конструктивные особенности гидроагрегата МГЭС, целесообразно использовать второй способ установления ВДС, так как в этом случае гидроагрегат не увеличивается в осевом направлении и будет иметь незначительное повышение стоимости [4,5].

При проектировании ВДС с использованием массивного ротора (маховик) задаются его главные размеры – осевая длина l и его диаметр ротора D .

Отношение этих размеров определяет величину расхода материалов, величину махового момента и расчетную мощность ВДС. Диаметр, длина и скорость вращения ротора позволяют предварительно определить электромагнитные нагрузки (линейная нагрузка и магнитная индукция в воздушном зазоре) и рассчитать магнитную цепь (рис. 1), трехфазную обмотку и параметры статора согласно [3,6].

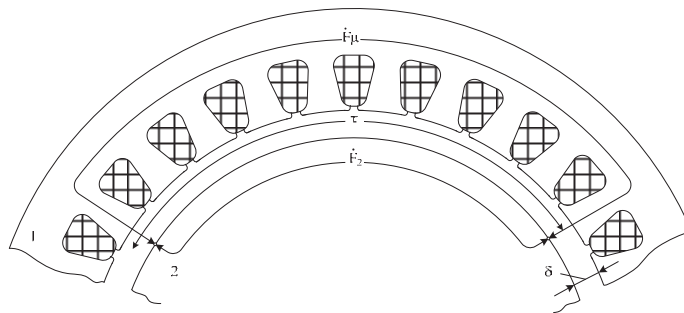


Рис. 1. Магнитная цепь внешней демпферной системы

Расчет параметров массивного ротора при различных режимах работы может быть произведен на базе схем замещения с использованием понятия комплексного магнитного сопротивления массивного магнитопровода.

Комплексное магнитное сопротивление магнитопровода Z представляет собой отношение комплексного значения амплитуды магнитодвижущей силы (МДС) $\dot{F}$, действующей на данный магнитопровод, к номинальному значению амплитуды проходящего через этот магнитопровод магнитного потока $\dot{\Phi}$ [7,8]:

$$Z = \frac{\dot{F}}{\dot{\Phi}} = R + jX, \quad (1)$$

где R определяет собой реактивную мощность, X – активную мощность потерь на вихревые токи.

Согласно [8], величина Z может быть определена в виде

$$Z = \dot{A} \frac{l}{u} \sqrt{\frac{\gamma f}{\mu_e}}, \quad (2)$$

где $\dot{A} = 1,13 + j1,85$; l – длина участка магнитной цепи в направлении вектора магнитной индукции; u – периметр его поперечного сечения; f – частота перемagnetивания; γ – удельная электрическая проводимость материала магнитопровода; μ_e – значение магнитной проницаемости магнитопровода, соответствующее напряженности магнитного поля на поверхности участка магнитопровода H_e .

Формула (2) учитывает непостоянство магнитной проницаемости, потери на вихревые токи и гистерезис и может применяться практически для всех используемых ферромагнитных материалов. Данные формулы справедливы при $u \gg \Delta$, где Δ – глубина проникновения электромагнитной волны: $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_e \gamma \omega}}$, ω – угловая частота. Глубина проникновения определяет толщину поверхностного слоя, в котором выделяется 95% всей энергии. На глубине Δ электромагнитная волна практически полностью затухает. Отношение составляющих комплексного магнитного сопротивления примерно постоянно и равно $R/X \cong 0,60$.

Для практических расчетов введено понятие единичного комплексного магнитного сопротивления. Это сопротивление магнитопровода, когда $\frac{l}{u} = 1, f = 1$. Единичное комплексное магнитное сопротивление $Z_{(1)}$ участка магнитопровода является функцией величин, определяющих электрические и магнитные свойства материала, из которого он выполнен. Следовательно, при постоянной температуре, когда можно считать $\gamma = \text{const}$, величина $Z_{(1)}$ зависит только от напряженности магнитного поля H_e на его поверхности.

Согласно [8], несмотря на многообразие свойств ферромагнитных материалов, зависимости $Z_{(1)} = f(H_e)$, построенные для большинства из них, сравнительно мало отличаются друг от друга. Поэтому во многих случаях при практических расчетах становится возможным пользоваться некоторой универсальной кривой $Z_{(1)} = f(H_e)$, являющейся средней для наиболее часто применяемых ферромагнитных материалов (рис. 2).

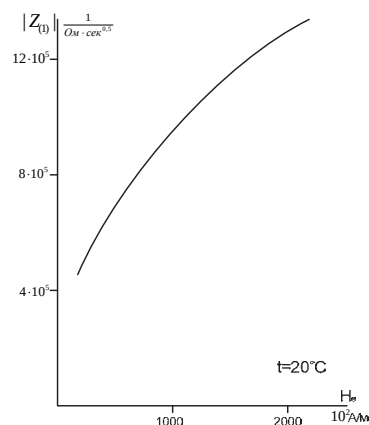


Рис. 2. Универсальная зависимость единичного комплексного магнитного сопротивления массивного магнитопровода от напряженности магнитного поля на его поверхности

На рис. 2 коэффициент аппроксимации кривой намагничивания принят $\kappa=7$, что дает достаточно точное значение $Z_{(1)}$ при практических расчетах.

Для построения схемы замещения ВДС необходимо знать приведенные параметры массивного ротора при основной частоте питающего напряжения f_0 : r'_{20}, x'_{20} – соответственно приведенные активное и реактивное сопротивления ротора (рис. 3).

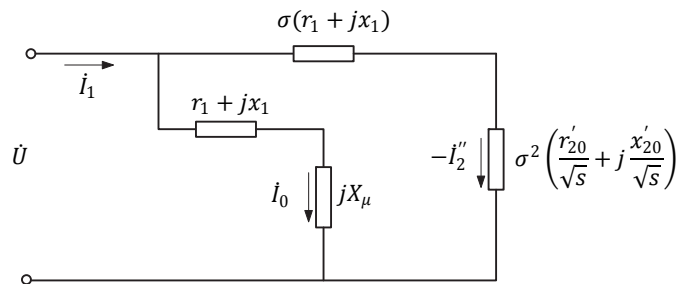


Рис. 3. Уточненная Г-образная схема замещения асинхронной машины с массивным ротором

На рис. 3 приведены следующие обозначения: $\dot{U}$ – напряжение; $\dot{I}_1$ – ток статора; $\dot{I}_0$ – ток намагничивающей ветви; $-\dot{I}_2''$ – ток главной ветви; r_1 – активное сопротивление статора; x_1 – реактивное сопротивление статора; r'_{20} – приведенное активное сопротивление ротора при $s=1$; x'_{20} – приведенное реактивное сопротивление ротора при $s=1$; σ – поправочный коэффициент.

В схеме замещения рис. 3 поправочный коэффициент σ изменяет основные параметры главной и намагничивающей ветвей и соответствующие токи по величине и фазовым углам, но не зависит от скольжения:

$$\sigma = \sqrt{\left(1 + \frac{x_1}{x_\mu}\right)^2 + \left(\frac{r_1}{x_\mu}\right)^2}. \quad (3)$$

Значение x_μ можно вычислить по следующей формуле:

$$x_\mu = 2mf \frac{\mu_0 D l}{k_\mu k_\delta \delta} \left(\frac{w_1 k_{o1}}{P} \right)^2. \quad (4)$$

В уточненной схеме замещения электрическое сопротивление x_μ соответствует магнитному сопротивлению сердечника якоря и воздушного зазора машины, а ток I_μ определяет собой МДС F_μ , необходимую для проведения магнитного потока взаимоиндукции через магнитопровод статора и воздушный зазор. Указанное обстоятельство отличает преобразованную схему замещения ВДС с массивным ротором от схемы замещения обычной асинхронной

машины, в которой I_{μ} определяет собой полную МДС, необходимую для проведения магнитного потока через всю магнитную цепь машины.

При исследованиях и расчетах ВДС параметры рассматриваются в относительных единицах, при этом в качестве базовых величин принимаются критические значения величин тока, мощности сопротивления, фазового угла, скольжения и т.п.

Результаты исследования. Расчет параметров массивного ротора ВДС необходимо проводить в следующем порядке, учитывая, что между электрическими и магнитными сопротивлениями имеется следующая связь $\frac{x}{r} = \frac{R}{X}$:

$$a = \frac{x'_{20}}{r'_{20}} = 0,6, \quad (5)$$

$$b = \frac{r_1}{x_1}, \quad (6)$$

$$h = \sqrt{\frac{1+a^2}{1+b^2}}, \quad (7)$$

$$q = \frac{a+b}{\sqrt{(1+a^2)(1+b^2)}}, \quad (8)$$

$$M_{\text{кр}} = \pm \frac{0.5U^2m}{\sigma x_1 n_1} \cdot \frac{1}{a+b+\sqrt{(1+a^2)(1+b^2)}}, \quad (9)$$

$$I'_{2\text{кр}} = \frac{U}{\sqrt{2}x_1} \cdot \sqrt{\frac{h}{a+b+\sqrt{(1+a^2)(1+b^2)}}}, \quad (10)$$

$$F_{2\text{кр}} = 2,7 \frac{w_1 k_{01}}{p} I'_{2\text{кр}}, \quad (11)$$

$$H_{\text{екр}} = \frac{F_{2\text{кр}}}{\sqrt{2}k_n \tau}, \quad (12)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий неравномерный характер распределения магнитной индукции вдоль полюсного деления. Согласно [6], $k_n=0,63$.

Согласно рис. 2, определяется $Z_{(1)20}$ при температуре 20°C. С учетом влияния температуры ротора на магнитное сопротивление имеем

$$Z_{(1)t^0} = \frac{Z_{(1)20}}{\sqrt{1+\alpha_{20}(t-20)}}, \quad (13)$$

где $\alpha_{20} = 0,005$ – термический коэффициент сопротивления стали.

Переход от комплексного магнитного сопротивления к электрическому при заданной температуре можно осуществить по формуле

$$z'_{20} = j \frac{\pi \sqrt{f_0}}{z_{(1)t^0}} \cdot \frac{m(w_1 U_{01})^2}{k_{\Lambda} p} = r'_{20} + jx'_{20}, \quad (14)$$

где k_{Λ} – коэффициент торцевого эффекта, определяемый согласно [9].

Для определения механических характеристик ВДС можно использовать относительные характеристики асинхронных машин с постоянными параметрами – формула Клосса, которая в данном случае может быть представлена в виде

$$M = M_{\text{кр}} \frac{2(1+q)}{\sqrt{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \sqrt{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + 2q}}}, \quad (15)$$

где $s_{\text{кр}} = \left(\frac{\sigma \cdot r'_{20}}{x_1} h \right)^2$ – критическое скольжение.

Необходимо отметить, что критическое скольжение асинхронной машины с массивным ротором не является постоянной величиной. Оно определяется степенью насыщения массивного ротора и, в конечном счете, зависит от скольжения s .

Величина скольжения, в которой параметр r'_{20} соответствует критическому значению вторичного тока $I'_{2\text{кр}}$, является действительным критическим скольжением. Действительное критическое скольжение является постоянной величиной для данной машины при заданном напряжении на зажимах и стабильной температуре, поскольку величина $I'_{2\text{кр}}$ при этих условиях также постоянна. При любом другом значении вторичного тока I'_2 меняется параметр r'_{20} , а следовательно, и величина критического скольжения. В связи с этим критическое скольжение, соответствующее любому значению вторичного тока $I'_2 \neq I'_{2\text{кр}}$, является текущим значением критического скольжения $s'_{\text{кр}}$, причем $s'_{\text{кр}} = f(s)$.

Таким образом, при учете насыщения массивного ротора действительные относительные характеристики этой асинхронной машины будут отличаться от полученных без учета насыщения лишь тем, что каждому значению скольжения s будет соответствовать определенное значение текущего критического скольжения $s'_{\text{кр}}$.

Следовательно, для определения момента по (15) вместо $\frac{s}{s_{\text{кр}}}$ необходимо подставить значение $\frac{s}{s'_{\text{кр}}}$. Зависимость, связывающая величину текущего критического скольжения $s'_{\text{кр}}$ со скольжением s , имеет следующий вид:

$$\frac{s}{s_{кр}} = \frac{s}{s'_{кр}} \left(\frac{\frac{1}{(s/s'_{кр})} + 2q \frac{1}{\sqrt{s/s'_{кр}}} + 1}{2(1+q)} \right)^{\frac{\kappa-1}{2\kappa}}. \quad (16)$$

Пользуясь выражением (16), можно вычислить зависимость $\frac{s}{s'_{кр}} = f\left(\frac{s}{s_{кр}}\right)$, по которой для каждого заданного относительного скольжения $s/s_{кр}$ определяется соответствующее текущее относительное скольжение $s/s'_{кр}$. При помощи полученного таким образом значения $s/s'_{кр}$ определяются все необходимые величины.

На основе разработанной методики были рассчитаны механические характеристики ВДС, которые были сравнены с экспериментальными данными [10], полученными на опытном образце, созданном на базе асинхронного двигателя А51-4. В созданном образце нормальный короткозамкнутый ротор был заменен массивным ферромагнитным ротором, у которого коэффициент $\kappa=7$. Механические характеристики представлены на рис. 4, где максимальное расхождение составляет не больше 6%.

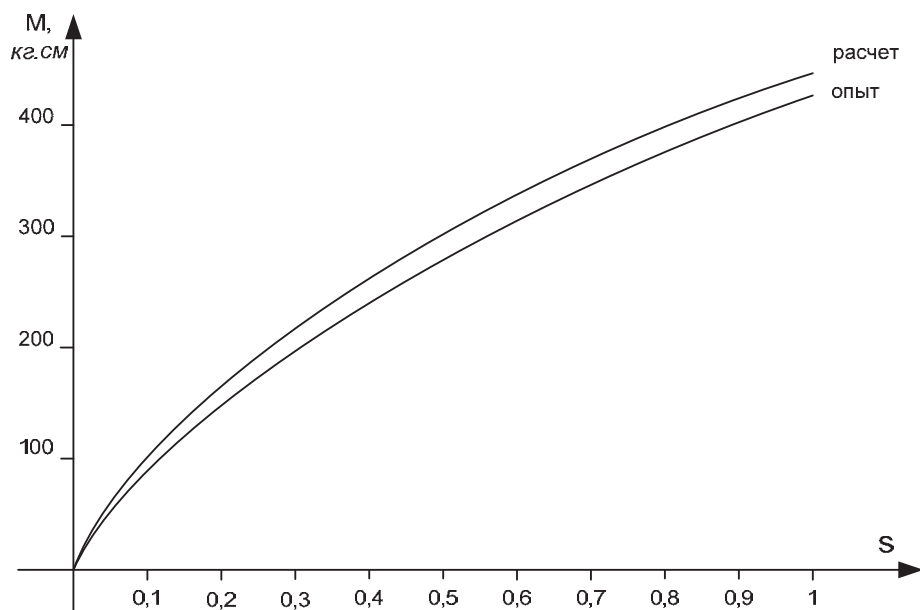


Рис. 4. Механическая характеристика ВДС

Таким образом, во время колебательного процесса гидрогенератора можно определить необходимый асинхронный момент, развиваемый внешней демпферной системой, и тем самым уменьшить амплитуду колебаний гидро-

агрегата МГЭС. Внешняя демпферная система способствует работе синхронного генератора при сравнительно длительных перегрузках, поскольку уменьшает нагрузку на внутреннюю демпферную обмотку генератора.

Кроме успокоения колебаний гидроагрегата, ВДС может использоваться также в качестве валоповоротной машины, обеспечивая плавный и безопасный пуск синхронного гидроагрегата, так как требуются высокий пусковой момент и устойчивый процесс за весь период пуска.

Заключение

1. Применение компактного гидроагрегата уменьшает массогабаритные размеры комплекса, что особенно рентабельно при реализации МГЭС в горных районах, а также позволяет уменьшить расходы на строительство.
2. Разработанная внешняя демпферная система, работающая параллельно с демпферной обмоткой синхронного генератора, уменьшает амплитуду колебаний гидроагрегата и повышает устойчивость работы системы.
3. Внешняя демпферная система улучшает режим работы синхронного генератора, уменьшает нагрузку на внутреннюю демпферную обмотку при продолжительной работе, позволяет генератору работать при перегрузках.
4. Разработанная методика расчета позволяет спроектировать внешнюю демпферную систему, в основе которой лежат главные размеры – длина и диаметр маховика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михайлов Л.П., Фельдман Б.Н., Марканова Т.К.** Малая гидроэнергетика/ Под ред. Л.П. Михайлова.-М.: Энергоатомиздат, 1989.-184 с.
2. **Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В.** Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов.-М.: Энергоатомиздат, 1991.-400 с.
3. **Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А.** Проектирование электрических машин.-Изд. 3-е, переработ. и доп.-М.: Энергия, 1969.-632 с.
4. **Сагателян М.А.** Предпосылки разработки компактного гидроагрегата для малых гидроэлектростанций // Вестник Инж. академии Армении.-Ереван, 2018.- Т.15, №2.- С. 240-244.
5. Արտոնագիր № 3068 А. Հիդրոէներգետիկա / **Մ. Մաղաթեղյան, Ա. Մայիլյան.**-2016:
6. **Копылов И.П.** Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов.-М.: Энергия, 1980.-496 с.
7. **Куцевалов В.М.** Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивным ротором.-М.-Л.: Энергия, 1966.-304 с.
8. **Нейман Л.Р.** Поверхностный эффект в ферромагнитных телах.-М.: Госэнергоиздат, 1949.- 243 с.
9. **Арешян Г.Л.** Метод учета краевого эффекта // Сб. научных трудов Ереванского политехнического института.-1954.-Вып. 5.-С. 25-29.

10. **Маилян А.Л., Никиян Н.Г.** Исследование асинхронного двигателя с массивным ротором // Труды научно-технической конференции ЕОВНИИЭМ. Часть 1.- Ереван, 1984.-С. 35-42.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 13.12.2018.

Ա.Լ. ՄԱՅԻԼՅԱՆ, Մ.Ա. ՍԱԴԱԹԵԼՅԱՆ

**ՓՈՔՐ ՀԻՂՐՈՒԷԼԵՎՏՐԱԿԱՅԱՆԻ ՀԻՂՐՈՍԳՐԵԳԱՏԻ ԲԱՐԵԼԱՎՎԱԾ
ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ԴԵՄՊՖԵՐԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ուսումնասիրված են կոմպակտ հիդրոագրեգատում թափանիվ կիրառության անհրաժեշտությունն ու հնարավորությունը: Մշակված է կոմպակտ հիդրոագրեգատի արտաքին դեմպֆերային համակարգ, և ներկայացված են դրա իրականացման եղանակները: Ներկայացված է թափանիվ՝ որպես հիդրոագրեգատի արտաքին դեմպֆերային փաթույթի կիրառության հնարավորությունը: Բերված է արտաքին դեմպֆերային համակարգի զանգվածային ռոտորի պարամետրերի հաշվարկի հաջողականությունը, որը տարբեր ռեժիմների համար կարող է իրականացվել զանգվածային մագնիսալարի կոմպլեքս մագնիսական դիմադրության հասկացության կիրառմամբ՝ փոխարինման սխեմաների հիման վրա: Մշակված մեթոդիկայի հիման վրա հաշվարկվել և փորձնական տվյալների հետ համեմատվել են արտաքին դեմպֆերային համակարգի մեխանիկական բնութագրերը, որոնցում առավելագույն տարամիտությունը կազմում է ոչ ավելի քան 6%:

Առանցքային բառեր. կոմպակտ հիդրոագրեգատ, թափանիվ, արտաքին դեմպֆերային համակարգ, զանգվածային ռոտոր, կոմպլեքս մագնիսական դիմադրություն, հաշվարկային մեթոդիկա:

A.L. MAYILYAN, M.A. SAGHATELYAN

**DEVELOPING A DAMPING SYSTEM WITH IMPROVED PROPERTIES FOR A
HYDRO-AGGREGATE OF A SMALL HYDROPOWER PLANT**

The necessity and opportunity of the flywheel usage in the compact hydro-aggregate are considered. An external damping system for a compact hydro-aggregate is developed, and the methods for its realization are given. The opportunity of the flywheel installation as a hydro-aggregate external damping system is presented. The order of calculating the massive rotor parameters of the external damping system is introduced, which can be done based on an equivalent circuit by using the complex magnetic resistance at different operation modes. The mechanical characteristics of the external damping system are calculated and compared with the experimental data where a maximum discrepancy is no more than 6%.

Keywords: compact hydro-aggregate, flywheel, external damping system, massive rotor, complex magnetic resistance, method of calculation.