

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄԱՂԱԹԵԼՅԱՆ ՄԱՐԻԱՄ ԱՇՈՏԻ

**ՓՈՔՐ ՀԷԿ-ԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ
ԲԱՐԵԼԱՎՈՒՄԸ**

Ե. 09.01 - «Էլեկտրատեխնիկա, էլեկտրամեխանիկա,
էլեկտրատեխնոլոգիաներ» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

Մ Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ 2019

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

ՏԱԳԱՏԵԼՅԱՆ ՄԱՐԻԱՄ ԱՇՈՏՈՎՆԱ

УЛУЧШЕНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАТОРОВ МАЛЫХ ГЭС

Ա Վ Տ Ր Ե Փ Ե Ր Ա Տ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.09.01 - “Электротехника, электромеханика,
электротехнологии”

ԵՐԵՎԱՆ 2019

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային
պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.թ. Ա.Լ. Մայիլյան
տ.գ.դ. Ժ.Դ. Դավիդյան
տ.գ.թ. Վ.Ն. Սարգսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Էներգետիկայի գիտահետազոտական
ինստիտուտ» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2019թ. նոյեմբերի 1-ին, ժամը 15⁰⁰-ին
Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող 038
մասնագիտական խորհրդի նիստում (0009, Երևան, Տերյան փող., 105):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2019թ. սեպտեմբերի 20-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
Գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.՝



Ա.Լ. Մայիլյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом
университете Армении (НПУА)

Научный руководитель:

к.т.н. А.Л. Маилян

Официальные оппоненты:

д.т.н. Ж.Д. Давидян

к.т.н. В.Н. Саргсян

Ведущая организация:

ЗАО “Научно-исследовательский институт
энергетики”

Защита диссертации состоится 1-го ноября 2019г. в 15⁰⁰ часов на заседании
специализированного совета 038, действующего при НПУА, по адресу: 0009,
Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 20-го сентября 2019г.

Ученый секретарь

Специализированного совета, к.т.н.



А.Л. Маилян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Синхронные гидроагрегаты, применяемые в малых гидроэлектростанциях (МГЭС), как правило, имеют низкие массогабаритные параметры. При разных переходных процессах в гидроэнергетической системе (несимметричные режимы, аварийные режимы) имеет место изменение устойчивости, которое выражается колебанием вращающихся узлов гидроагрегата относительно синхронной скорости и увеличением потерь в некоторых узлах. Возникающие колебания становятся причиной снижения качества вырабатываемой электроэнергии. Для увеличения устойчивости и уменьшения колебаний, как известно, в синхронных генераторах применяются демпферные обмотки. Эти колебания зависят от вращающихся масс (моментов инерции) и возникающих при этом моментов, которые стремятся удержать систему в синхронном режиме.

В настоящее время в мире к быстро развивающимся МГЭС предъявляются строймонтажные, технические и экономические, а также экологические требования. Правильный выбор геометрических размеров гидроагрегата МГЭС обеспечивает низкие массогабаритные параметры, стоимость гидрогенератора и всей системы, а также строймонтажные расходы. Такой гидроагрегат с низкими массогабаритными параметрами можно назвать “компактным”. Составляющие узлы компактного гидроагрегата также обеспечивают сравнительно высокую устойчивость системы и, при необходимости, позволяют решить вопросы оптимизации.

- “Компактность” гидроагрегата МГЭС дает возможность обеспечить такую конструкцию и его минимальные массогабаритные параметры, что позволяет также обеспечить качество вырабатываемой электроэнергии.

- Несмотря на особенности МГЭС, такие как массогабаритные параметры гидроагрегата, оптимальное согласование скоростей турбины и генератора, возникновение колебаний генератора, обеспечение стабильной работы, тем не менее на них в основном распространяются подходы и решения, типичные для мощных ГЭС, что приводит к не очень удовлетворительным результатам, связанным с энергетическими, экономическими, строймонтажными, а также экологическими факторами.

- Применение компактного гидроагрегата с использованием генератора с высокой скоростью вращения обеспечивает сравнительно высокую рентабельность МГЭС.

- Существующие маломощные гидроагрегаты имеют существенные недостатки конструктивного и электроэнергетического характера, которые выражаются колебательным процессом в гидроагрегате и, следовательно, приводят к увеличению дополнительных потерь и уменьшению устойчивой работы системы.

Указанные вопросы в установках МГЭС изучены и представлены с иных точек зрения, поэтому улучшение режимов работы генератора МГЭС путем увеличения эффективности работы демпферной системы является актуальной проблемой.

Областью исследования в настоящей работе являются гидроагрегаты малой мощности для МГЭС от 1 до 10 *MВт*, предназначенные как для серийного, так и для индивидуального производства.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является:

- разработка компактного гидроагрегата обеспечивающего минимальные массогабаритные параметры и стоимость, высокую устойчивость и рентабельность системы гидроагрегата;
- исследование и разработка демпферной системы синхронного гидроагрегата;
- улучшение режимов работы синхронного генератора МГЭС;
- обеспечение безопасного пуска синхронного гидроагрегата с применением демпферной системы, а также ограничение угонной скорости при внезапных аварийных режимах.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- обоснование целесообразности и эффективности применения малогабаритного синхронного генератора с малым числом полюсов в гидроагрегатах малой мощности;
- разработка конструкции и принципа проектирования компактного гидроагрегата МГЭС;
- разработка и исследование математической модели колебательного процесса маломощного гидроагрегата;
- разработка и исследование внешней демпферной системы (ВДС) маломощного гидроагрегата;
- разработка методики и программы расчета ВДС;
- применение ВДС для пуска и аварийной остановки синхронного гидроагрегата малой мощности.

Научная новизна.

1. Разработана конструкция компактного гидроагрегата для МГЭС, обеспечивающая сравнительно высокие технико-экономические показатели.
2. Разработана ВДС для маломощного гидроагрегата, которая способствует уменьшению колебаний, увеличению устойчивой работы и улучшению режима работы синхронного генератора.
3. Разработана методика расчета ВДС.
4. Предложен подход к улучшению электрических и магнитных параметров ВДС, который позволит обеспечить необходимые параметры всего гидроагрегата в соответствии с техническим заданием.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Подход к проектированию гидроагрегатов малой мощности с высокими технико-экономическими показателями.
2. Разработка ВДС для гидроагрегата малой мощности.
3. Методика расчета ВДС на основе понятия единичного комплексного сопротивления.

Практическая ценность работы.

1. Компактный гидроагрегат, разработанный для МГЭС, позволяет уменьшить массогабаритные параметры, обеспечивая высокие технико-экономические показатели и сравнительно высокий коэффициент полезного действия (КПД) комплекса.

2. Разработанная ВДС гидроагрегата МГЭС позволяет уменьшить колебания синхронного генератора, а также всего гидроагрегата в целом, повысить устойчивую работу системы и, кроме того, обеспечить пуск и аварийное торможение гидроагрегата.

3. Составленные методика и программа расчета позволяют спроектировать ВДС для данного гидроагрегата, получить параметры и характеристики системы и спроектировать гидроагрегат с наименьшей амплитудой колебаний.

4. Рассчитанные механические характеристики ВДС сравнены с экспериментальными данными, полученными на опытном образце, созданном на базе асинхронного двигателя А51-4, где короткозамкнутый ротор нормального исполнения был заменен массивным ферромагнитным ротором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано семь научных трудов, в том числе получен один патент на изобретение.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: научных семинарах кафедры “Электрические машины и аппараты” НПУА (2014-2018 гг.); годичных конференциях НПУА (2014-2018 гг.); семинарах проекта “SYNERGIA - Systematic and Sustainable Energy Efficiency in Armenia”, финансируемого Федеральным министерством образования и научных исследований Германии (2015-2016 гг.); 21-й литовской конференции молодых исследователей “Science – Future of Lithuania”, Electronics and Electrical Engineering, VGTU (2018 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 101 наименования, а также трех приложений. Основной текст составляет 117 страниц, включая 32 рисунка и 2 таблицы. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, представлены научная новизна, практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается обзор малой гидроэнергетики в мире, в том числе и в Армении, а также применяемых в МГЭС гидроагрегатов, гидротурбин и гидрогенераторов.

Малые гидроэлектростанции разделяют на категории. Собственно МГЭС находятся в диапазоне мощностей от 1 до 10 МВт, мини-ГЭС имеют мощность от 100 кВт до 1 МВт, менее 100 кВт мощности имеют микро-ГЭС. Термин “малые гидроэлектростанции” остается в большинстве случаев обобщающим. МГЭС классифицируют по разным параметрам: напору, способу создания напора, схеме основных сооружений, диаметру рабочего колеса и др. МГЭС по напору разделяют на низко-, средне- и высоконапорные.

Тип гидроагрегатов для МГЭС определяется требуемой мощностью и высотой напора. Высота напора определяет тип применяемой турбины и вид гидроагрегата в целом.

В высоко- и средненапорных МГЭС используются гидроагрегаты с вертикальными валами. Преимуществом вертикальных гидроагрегатов является отсутствие радиальных нагрузок от веса турбины, вала и генератора.

В низконапорных МГЭС с напором до 10 м эффективны горизонтальные гидроагрегаты. В основном применяются горизонтальные гидроагрегаты с S-образной отсасывающей трубой и прямоточные гидроагрегаты с прямой отсасывающей трубой.

В МГЭС применяются все возможные типы гидротурбин. Гидротурбины, применяемые в малой гидроэнергетике, делятся на два типа: активные и реактивные.

Каждому существующему типу турбины соответствуют оптимальные значения напора и расхода воды, при которых МГЭС может работать с возможной максимальной эффективностью (рис. 1). Общая эффективность ГЭС зависит от эффективностей турбины и электрогенератора. В современных гидротурбинах полный КПД равен 0,85...0,91, а при благоприятных условиях работы лучших образцов гидротурбин он достигает 0,94...0,95.

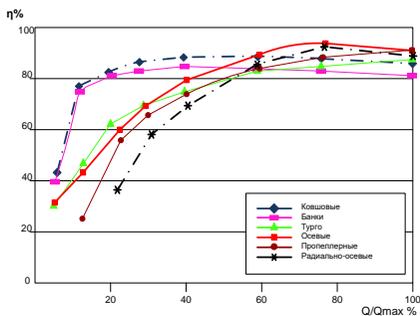


Рис. 1. Зависимость эффективностей разных типов турбин от номинального расхода

Тип применяемой гидротурбины зависит от напора, расхода воды и требуемой мощности (рис. 2).

В малой гидроэнергетике применяются генераторы переменного тока всех современных типов. Основное распространение получили синхронные и асинхронные генераторы. В последние десятилетия в малой гидроэнергетике получили распространение также синхронные генераторы с постоянными магнитами, машины двойного питания (асинхронизированные синхронные машины) и индукторные генераторы.

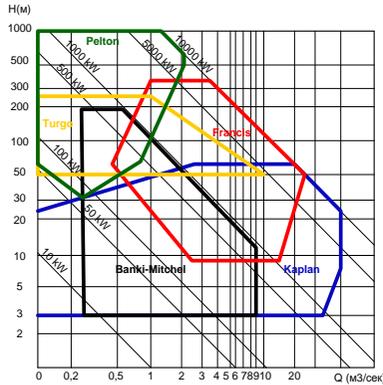


Рис. 2. Тип турбин в зависимости от напора и расхода воды

Во второй главе исследован режим работы синхронного гидроагрегата во время колебательного процесса. Разработана математическая модель колебательного процесса, которая позволяет определить и уменьшить величину колебаний индуктора синхронного генератора, тем самым повысить устойчивость работы гидроагрегата и качество вырабатываемой электроэнергии за счет подавления высших гармонических составляющих при несимметричных нагрузках.

В основе разработанной математической модели лежат уравнения синхронного генератора, составленные в пространстве Парка-Горева, где последнее уравнение описывает механическое движение вращающихся частей гидроагрегата с синхронным генератором в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_f = i_f R_f + \frac{d\psi_f}{dt}, \\ 0 = i_{\partial d} R_{\partial d} + \frac{d\psi_{\partial d}}{dt}, \\ 0 = i_{\partial q} R_{\partial q} + \frac{d\psi_{\partial q}}{dt}, \\ u_d = \frac{d\psi_d}{dt} + (1-s)\omega_c \psi_q + i_d R, \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + (1-s)\omega_c \psi_d + i_q R, \\ J \frac{d\Omega}{dt} = M_{\partial} - M_m, \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_f , i_f , R_f , ψ_f – соответственно напряжение, ток, активное сопротивление и потокоцепление обмотки возбуждения; $i_{\partial d}$, $i_{\partial q}$ – токи демпферной обмотки

по осям d и q; $R_{\dot{d}d}, R_{\dot{d}q}$ – активные сопротивления демпферной обмотки по осям d и q; $\psi_{\dot{d}d}, \psi_{\dot{d}q}$ – потокосцепления демпферной обмотки по осям d и q; $u_d, u_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q$ – соответственно напряжения, токи и потокосцепления по осям d и q; R – активное сопротивление обмотки статора; J – момент инерции вращающихся частей гидроагрегата; Ω – угловая скорость вращения; $M_{эл}$ – электромагнитный момент; M_m – момент на валу турбины; $s = \frac{(\omega_c - \omega_p)}{\omega_c}$ – скольжение; ω_c – синхронная частота вращения; ω_p – частота вращения ротора генератора.

Уравнение движения всей системы при переходе от одного установившегося режима к другому учитывает все изменяющиеся моменты. Система уравнений (1) фактически осуществляют связь между гидроагрегатом и энергосистемой. Для составления математической модели гидроагрегата последний представляется в виде крутильной схемы (рис. 3), которая состоит из ряда дисков, соединенных между собой упругими связями. Гидроагрегат можно в общем случае представить в виде n массовых крутильных схем, после подстановки которых в уравнение Лагранжа получаем систему из n дифференциальных уравнений второго порядка. Точность расчета для одно-, двух- и трехмассовой схем практически остается одинаковой.

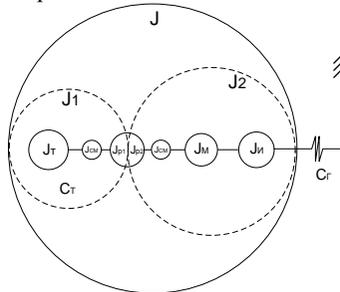


Рис. 3. Крутильная схема гидроагрегата МГЭС

Кинетическая и потенциальная энергии для рассматриваемой схемы соответственно равны

$$\begin{cases} T = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2, \\ V = \frac{1}{2} C \theta^2. \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя выражения для кинетической и потенциальной энергий в известное уравнение Лагранжа, получим следующее дифференциальное уравнение второго порядка:

$$J_m \Delta \ddot{\theta} + D_m \Delta \dot{\theta} + C_m \Delta \theta = 0, \quad (3)$$

где J_m , D_m , C_m – соответственно момент инерции, коэффициент демпфирования и синхронная жесткость, приведенные к номинальному вращающему моменту турбины.

При помощи прямого и обратного преобразований Лапласа решается дифференциальное уравнение (3) и вычисляются демпферный коэффициент $\alpha = \frac{D_m}{2J_m}$ и круговая частота свободных колебаний $\beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha^2}$, где $\omega_c^2 \equiv \frac{C_m}{J_m}$ –

угловая частота системы без демпфирования.

Демпферный коэффициент α зависит от коэффициента демпфирования D_m , который представляет собой тангенс угла касательной к зоне устойчивой работы характеристики асинхронного момента синхронного генератора:

$$D_m = tg \gamma = \left(\frac{\partial M_a}{\partial \theta} \right)_0 \quad (\text{рис. 4}).$$

Чем больше угол γ , (коэффициент демпфирования D_m), тем больше демпфирующие свойства гидроагрегата (генератора) и тем жестче "синхронный вал" системы.

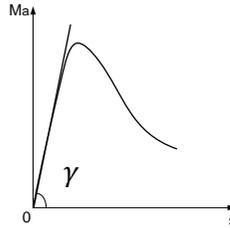


Рис. 4. Зависимость асинхронного момента синхронного генератора от скольжения

Используя формулу Клосса, определяется угол касательной к устойчивой зоне асинхронного момента в точке "0", что соответствует коэффициенту демпфирования синхронного генератора:

$$D_m = tg \gamma = \left(\frac{\partial M_a}{\partial s} \right)_0 = \frac{2}{s_{кр}}. \quad (4)$$

Для увеличения демпферных свойств генератора и всего гидроагрегата необходимо увеличить угол γ , что позволит уменьшить величину колебаний ротора и повысить устойчивость электрической системы.

Коэффициент жесткости для синхронного гидроагрегата определяется в виде

$$C = (U_c E_{q0} / x_d) \cos \theta_0 + ((x_d - x_q) U_c^2 / x_d x_q) \cos 2\theta_0, \quad (5)$$

где x_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси; x_q – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси; U_c – напряжение сети; E_{q0} – электродвижущая сила возбуждения по поперечной оси генератора.

Синхронная жесткость, согласно (5), представляет собой величину синхронизирующей мощности, вычисленную для координаты θ_0 по угловой характеристике машины (рис. 5).

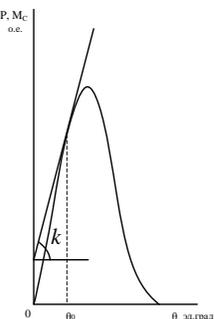


Рис. 5. Угловая характеристика синхронного генератора

Коэффициент жесткости обусловлен синхронным моментом машины, и чем больше жесткость, тем устойчивее работа системы. Таким образом, угол касательной к угловой характеристике синхронного генератора в точке θ_0 определяется в виде

$$C = \operatorname{tg} k = \left(\frac{\partial M_c}{\partial \theta} \right)_0, \quad (6)$$

где M_c – синхронизирующий момент синхронного генератора; k – угол касательной к угловой характеристике.

В третьей главе изучаются процесс подавления колебаний синхронного генератора с использованием демпферных обмоток, а также вопросы использования демпферной обмотки при улучшении режима работы синхронного генератора.

Явнополюсные синхронные машины снабжаются демпферными обмотками для следующих целей:

- повышение пускового момента синхронных двигателей, компенсаторов и преобразователей;
- предотвращение качаний;
- подавление колебаний, возникающих из-за толчков при коротких замыканиях или переключениях;
- предотвращение искажения формы кривой напряжения несимметричной нагрузкой – подавление высших гармонических составляющих;

- уменьшение асимметрии фазных напряжений на выводах при несимметричной нагрузке, т.е. уменьшение напряжения обратной последовательности;
- предотвращение перегрева поверхности полюсов однофазных генераторов и уравнивателей фаз вихревыми токами, индуцируемыми установившимися токами обратной последовательности в якоре;
- создание тормозного момента в генераторе при несимметричных коротких замыканиях и уменьшение вследствие этого избыточного момента;
- создание дополнительного момента при синхронизации генераторов, особенно когда синхронизация производится автоматически;
- снижение скорости восстановления напряжения на контактах выключателей;
- уменьшение механических напряжений в изоляции обмотки возбуждения в случае скачков тока в цепи якоря, особенно в тех случаях, когда токи якоря неодинаково воздействуют на все полюсы, как это бывает при внутренних коротких замыканиях.

Влияние демпферных обмоток на устойчивость электрических систем проявляется в основном в том, что они:

- создают демпфирующий (асинхронный) момент прямой последовательности;
- создают тормозной момент обратной последовательности в случае несимметричных коротких замыканий;
- изменяя полное сопротивление обратной последовательности, влияют на отдаваемую машиной электрическую мощность прямой последовательности в случае несимметричных коротких замыканий;
- создают от аperiodической составляющей тока статора тормозной момент, который, несмотря на малое значение, иногда учитывается.

Эффективность демпферной обмотки как успокоителя колебаний зависит от ее активного сопротивления, так как частота токов, возникающих в демпферной обмотке при качаниях генератора, невелика ($1 \dots 2 \text{ Гц}$).

В четвертой главе приведено конструктивное решение гидроагрегата для МГЭС, которое можно назвать компактным, исходя из массогабаритных и экономических параметров последнего. Параметры синхронного генератора определяются его главными размерами, которые зависят от мощности, скорости вращения и нагрузок, выбранных для его магнитной системы и электрической части.

Выбор главных размеров для гидрогенераторов производится с учетом необходимости получения заданного махового момента GD^2 гидроагрегата. Маховой момент гидроагрегата принято повышать за счет конструкции ротора гидрогенератора, в основном – за счет увеличения его диаметра.

При использовании генератора с высокой скоростью вращения уменьшаются его массогабаритные параметры, а следовательно, снижаются экономические расходы и сроки окупаемости МГЭС. Для сопоставления скоростей вращения гидротурбины и генератора между ними устанавливается повышающая передача – мультипликатор. При уменьшении массогабаритных размеров гидрогенератора уменьшается устойчивость работы и увеличиваются

возможные отрицательные воздействия переходных процессов на гидроагрегат. Для увеличения инерции вращающихся частей в гидроагрегат устанавливается маховик, что позволяет получить минимально допустимый маховой момент гидроагрегата и, следовательно, увеличить устойчивость гидроагрегата. При наличии маховика в гидроагрегате маховой момент будет равен сумме маховых моментов генератора и маховика. Маховик является также механическим демпфером, который успокаивает колебания гидроагрегата.

В результате анализа серийно производимых генераторов получены кривые зависимости махового момента генератора от его скорости вращения (рис. 6). Данная зависимость является усредненной кривой зависимости махового момента от скорости вращения гидрогенератора и может применяться при практических расчетах. С помощью кривой можно получить предварительные данные для расчета маховика и в дальнейшем мультипликатора. Определение параметров мультипликатора позволяет определить параметры необходимой турбины.

Маховой момент маховика определяется разностью маховых моментов генераторов высокой и низкой скорости:

$$(GD^2)_M = (GD^2)_{ген2} - (GD^2)_{ген1}, \quad (7)$$

где $(GD^2)_{ген2}$ – маховой момент генератора с низкой скоростью, который обеспечивает необходимый маховой момент гидроагрегата; $(GD^2)_{ген1}$ – маховой момент генератора с высокой скоростью, который в совокупности с маховиком обеспечивает минимальный необходимый маховой момент и минимальные габариты гидроагрегата.

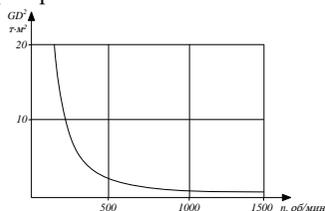


Рис. 6. Зависимость махового момента гидрогенератора от его скорости вращения

Учитывая полученный маховой момент, а также исходя из конструктивных соображений, можно определить длину и диаметр маховика, который представляет собой сплошной стальной цилиндр.

Диаметр маховика равен

$$D = \sqrt[4]{4(GD^2)_M / \pi \rho l}, \quad (8)$$

где ρ – плотность вещества (стали); l – длина маховика, которая выбирается по конструкции гидроагрегата.

Таким образом, можно сказать, что малогабаритный гидроагрегат, имеющий сравнительно высокую скорость вращения, состоит из гидротурбины, мультипликатора, гидроагрегата и всей системы, что особенно ценно при строительстве и установке МГЭС в горных и труднодоступных районах. Такой гидроагрегат назовем "компактным".

Для улучшения режима работы синхронного генератора разработана внешняя демпферная система для гидроагрегата МГЭС. ВДС создает асинхронный момент, имеющий противоположное движению ротора направление во время колебательного процесса, который работает параллельно с внутренней демпферной системой.

ВДС может быть установлена тремя способами:

1. На вал гидроагрегата устанавливается статор нормального исполнения асинхронной машины.
2. В качестве массивного ротора используется маховик гидрогенератора, если последний имеется в наличии.
3. В гидроагрегат устанавливается асинхронная машина нормального исполнения.

Во всех трех случаях ВДС представляет собой асинхронную машину (с массивным ротором – в первых двух случаях и нормального исполнения – в третьем) и работает параллельно с внутренней демпферной обмоткой, которая, по сути, тоже является асинхронной машиной. Во время колебательного процесса индуктора синхронного генератора ВДС создает асинхронный момент, который имеет противоположное движению ротора направление. Таким образом, в процессе колебаний асинхронный момент, созданный ВДС, стремится стабилизировать синхронную скорость вращения и уменьшить амплитуду колебаний. При наличии ВДС нагрузка на внутреннюю демпферную обмотку уменьшается, что приводит к уменьшению искажения формы кривой магнитного потока синхронного генератора и повышению качества вырабатываемой электроэнергии. Синхронный генератор может работать при сравнительно длительных перегрузках, а температура демпферной обмотки будет в допустимых пределах.

Согласно принципиальной схеме компактного гидроагрегата (рис. 7), согласующий трансформатор (СТ) может быть применен в том случае, если разработанная ВДС отличается по напряжению от синхронного генератора.

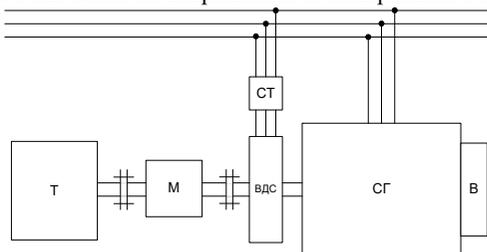


Рис. 7. Принципиальная схема компактного гидроагрегата для МГЭС:

T – турбина, M – мультипликатор, ВДС – внешняя демпферная система,
 $СГ$ – синхронный генератор, B – возбудитель, $СТ$ – согласующий трансформатор

В компактных гидроагрегатах успокоительный момент несколько больше из-за наличия ВДС, которая работает параллельно с демпферной обмоткой синхронного генератора. Для оценки влияния демпферного момента всего гидроагрегата на устойчивость составлено уравнение моментов синхронного генератора при его колебаниях.

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

Учитывая, что внутренняя и внешняя демпферные системы связаны электрически и механически, уравнение моментов СГ компактного гидроагрегата имеет вид

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \Delta\theta}{dt^2} + (D_{m.e} + D_{m.g}) \frac{d\Delta\theta}{dt} + M_{c.m} \Delta\theta = 0. \quad (9)$$

Постоянная времени затухания колебаний равна

$$T_k = \frac{2J}{p(D_{m.e} + D_{m.g})}, \quad (10)$$

а угловая частота свободных колебаний:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{pM_{c.m}}{J}}. \quad (11)$$

Согласно уравнению (10), колебания затухают тем быстрее, чем больше коэффициент демпфирования компактного гидроагрегата. Наличие ВДС приводит к уменьшению постоянной времени затухания колебаний и величины отклонения угла $\Delta\theta$.

В основе проектирования ВДС с использованием массивного ротора (маховик) лежат его главные размеры – осевая длина l и диаметр ротора D . Отношение этих размеров определяет величину расходов 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. 8), трехфазную обмотку и параметры статора.

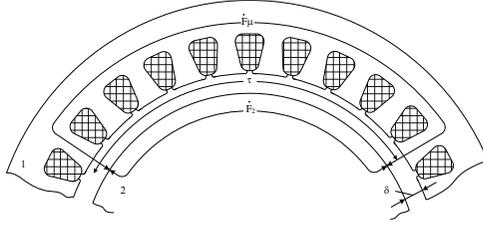


Рис. 8. Магнитная цепь внешней демпферной системы

Расчет параметров массивного ротора при различных режимах работы может быть произведен на базе схем замещения с использованием понятия комплексного магнитного сопротивления массивного магнитопровода (рис. 9).

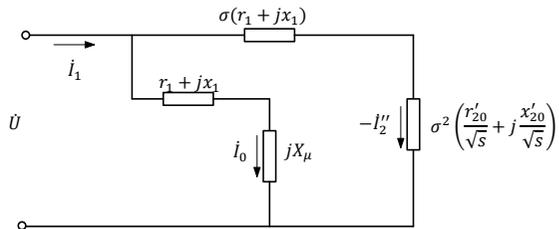


Рис. 9. Уточненная Г-образная схема замещения асинхронной машины с массивным ротором

На рисунке введены 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.

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

$$M_3 = M_{кр} \frac{2(1+q)}{\sqrt{\frac{s}{s'_{кр}} + \sqrt{\frac{s'_{кр}}{s} + 2q}}}, \quad (12)$$

где $s_{кр} = \left(\frac{\sigma \cdot r'_{20}}{x_1} h \right)^2$ – критическое скольжение. 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 . При учете насыщения массивного ротора действительные относительные характеристики этой асинхронной машины будут отличаться от полученных характеристик без учета насыщения лишь тем, что каждому значению скольжения s будет соответствовать определенное значение текущего критического скольжения $s'_{кр}$.

Для определения момента по (12) вместо $\frac{s}{s_{кр}}$ необходимо подставить значение $\frac{s}{s'_{кр}}$. Зависимость, связывающая величину текущего критического скольжения $s'_{кр}$ со скольжением s , имеет следующий вид:

$$\frac{s}{s_{кр}} = \frac{s}{s'_{кр}} \left(\frac{1}{\left(\frac{s}{s'_{кр}}\right) + 2q \frac{1}{\sqrt{s/s'_{кр}}} + 1} \right)^{\frac{\sigma-1}{2\sigma}}. \quad (13)$$

Пользуясь выражением (13), можно вычислить зависимость $\frac{s}{s_{кр}} = f\left(\frac{s}{s'_{кр}}\right)$,

по которой для каждого заданного относительного скольжения $\frac{s}{s_{кр}}$

определяется соответствующее текущее относительное скольжение $\frac{s}{s'_{кр}}$. При

помощи полученного таким образом значения $\frac{s}{s'_{кр}}$ определяются все необходимые величины.

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

Внешняя демферная система в виде асинхронной машины с массивным ротором имеет благоприятные пусковые свойства, обеспечивает большой пусковой момент и одновременно жесткую механическую характеристику в рабочем режиме при малых скольжениях.

Пологая механическая характеристика позволяет ВДС с массивным ротором устойчиво работать в широком диапазоне изменения скорости вращения, что обусловлено большой величиной критического скольжения.

Изменяя параметры массивного магнитопровода, в частности, применяя сплав меди и железа (Fe-Cu), можно уменьшить критическое скольжение ВДС,

увеличивая при этом пусковой момент. Большое значение пускового момента обеспечивает плавный и безопасный пуск синхронного гидроагрегата при $s_{кр}=1$.

ВДС также обеспечивает торможение гидроагрегата при внезапных аварийных режимах, таких как увеличение внешнего вращающего момента, что имеет место при увеличении напора воды. Это обусловлено тем, что аварийные клапаны срабатывают не мгновенно, и до того, как вход воды в напорный трубопровод ограничивается с помощью регулировочных клапанов, скорость гидроагрегата успеет увеличиться, что приводит к выходу из строя системы. С помощью ВДС и системы управления можно создать обратный момент, обеспечивая таким образом безопасное торможение гидроагрегата.

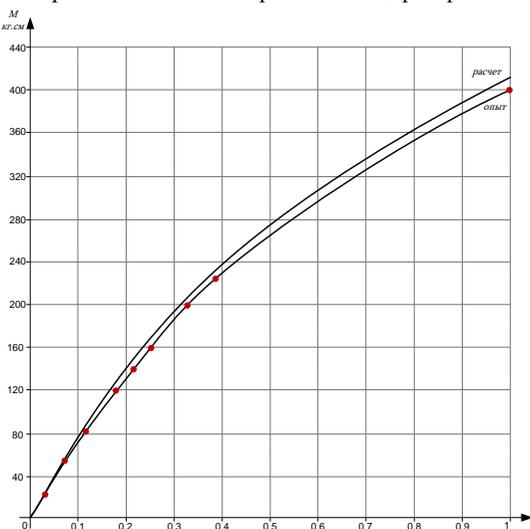


Рис. 10. Механическая характеристика ВДС

В пятой главе разработана программа расчета для автоматизированного проектирования ВДС синхронного гидроагрегата.

Для проектирования и получения соответствующих параметров ВДС использован язык программирования С#, работающий в среде .Net. Это дает ряд преимуществ: экономия рабочих ресурсов, возможность применения не только в операционной системе Windows, но и в системах Mac OS, Unix, Linux, безопасный код, при помощи которого программные ошибки сводятся к минимуму.

Созданное интерактивное программное обеспечение (ПО) проектирования электрических машин имеет централизованную базу данных, которая содержит все необходимые таблицы и графики для расчета электрических машин. ПО составлено таким образом, чтобы в дальнейшем была возможность изменять расчетные формулы. Кроме того, ПО позволяет спроектировать оптимальную

машину посредством динамичного построения целевых и ограничивающих функций.

С помощью разработанного ПО можно спроектировать ВДС для синхронного гидроагрегата, что позволяет наилучшим образом уменьшить амплитуду колебаний синхронного генератора, улучшить режимы его работы, а также снизить экономические расходы и сроки окупаемости строительства МГЭС. ПО дает возможность рассчитать почти все параметры ВДС. В результате проектирования получается механическая характеристика ВДС и рассчитывается ее демпферный коэффициент – производная асинхронного момента в точке 0 (рис. 11). Полученные результаты позволяют точно оценить демпферные свойства ВДС, увеличение демпферного коэффициента системы и обеспечить стабильную работу последней.



Рис. 11. Расчет демпферного коэффициента ВДС

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате анализа известных работ, посвященных энергетическому узлу малой гидроэлектростанции, улучшению режимов работы и повышению устойчивой работы применяемого в нем синхронного генератора, обоснованы основные направления улучшения режимов работы синхронного генератора малой гидроэлектростанции.

2. На основе принципов улучшения режимов работы синхронного генератора малой гидроэлектростанции и исходя из необходимости повышения устойчивой работы, выявлены показатели, влияющие на эффективность синхронного генератора.

3. Разработана математическая модель колебательного процесса синхронного генератора, которая дает возможность определить демпферный коэффициент и коэффициент синхронной жесткости и путем обеспечения необходимой величины снизить время переходного процесса и амплитуду колебаний.

4. Разработано конструктивное решение компактного гидроагрегата с высокими технико-экономическими показателями, применение которого уменьшает габаритные размеры комплекса, что наиболее рентабельно при

строительстве малых гидроэлектростанций в горных районах. Приведенный метод проектирования компактного гидроагрегата дает возможность выбрать оптимальную скорость турбины, обеспечивая максимальную эффективность системы.

5. Разработана и спроектирована внешняя демпферная система для синхронного гидроагрегата, который, являясь асинхронной машиной с массивным ротором, подобно внутренней демпферной обмотке синхронного генератора, обеспечивает сравнительно большой демпферный коэффициент и малую амплитуду колебаний, а также устойчивую работу системы гидроагрегата.

6. Разработана методика расчета для проектирования внешней демпферной системы. Полученные расчетные результаты сравнены с экспериментальными данными.

7. На основе созданной методики расчета разработана программное обеспечение для автоматизированного проектирования внешней демпферной системы с помощью языка программирования C#, работающего в среде .Net. Это позволяет спроектировать внешнюю демпферную систему, в основе которой лежат геометрические размеры составляющего узла синхронного гидроагрегата – маховика.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Արտոնագիր № 3068 А. Հիդրոէլեկտրակայան / **Մ. Սաղաթեյան, Ս. Մալիժյան**.-2016:

2. **Маилян А.Л., Сагателян М.А.** Математическая модель колебательного процесса гидроагрегата малой гидроэлектростанции // Вестник НПУА: Сборник научных статей.-Ереван, 2017.-Часть 2.-С.695-702.

3. **Сагателян М.А., Казарян Г.Х.** Вопросы преобразования энергии водных ресурсов горных рек // Вестник НПУА: Сборник научных статей.-Ереван, 2018.-Часть 3.-С. 720-729.

4. **Сагателян М.А.** Предпосылки разработки компактного гидроагрегата для малых гидроэлектростанций // Вестник Инж. академии Армении.-Ереван, 2018.-Т.15, №2.- С. 240-244.

5. **Маилян А.Л., Сагателян М.А.** Влияние демпферной системы на устойчивость режимов работы компактного гидроагрегата // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика.-Ереван, 2018.-№2.- С. 39-46.

6. **Маилян А.Л., Сагателян М.А.** Разработка демпферной системы с улучшенными свойствами для гидроагрегата малой гидроэлектростанции // Изв. НАН РА и НПУА. Серия “Техн. науки”.-2018.-Т. LXXI, №4.-С. 432-441.

7. **Сагателян М.А.** Разработка программного обеспечения автоматизированного проектирования внешней демпферной системы // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика.-Ереван, 2019 .-№1.- С. 21-29.

Մարիամ Աշոտի Սաղաթեյան

ՓՈՔՐ ՀԷԿՏՐԻ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱԿՆԻՔԱՅԻՆ ՈՒՇԻՄՆԵՐԻ ԲԱՐԵԼԱՎՈՒՄԸ

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Փոքր հիդրոէներգետիկայում կիրառվող սինխրոն հիդրոագրեգատները, որպես կանոն, ունենում են ավելի փոքր զանգվածագաբարիտային պարամետրեր: Հիդրոէներգետիկ համակարգում տարբեր անցումային պրոցեսների ժամանակ (ոչ սինխրոնիկ ռեժիմներ, վթարային ռեժիմներ) տեղի է ունենում կայունության փոփոխություն, ինչն արտահայտվում է սինխրոն արագության նկատմամբ հիդրոագրեգատի պտտվող հանգույցների տատանումներով և որոշ հանգույցներում կորուստների մեծացմամբ: Առաջացող տատանումները դառնում են արտադրվող էլեկտրաէներգիայի որակի իջեցման պատճառ: Կայունության բարձրացման և տատանումների փոքրացման համար, ինչպես հայտնի է, սինխրոն գեներատորներում օգտագործվում են դեմպֆերային փաթույթներ: Տատանումները կախված են պտտվող զանգվածներից (իներցիայի մոմենտներ) և առաջացող մոմենտներից, որոնք ձգտում են պահել համակարգը սինխրոն ռեժիմում:

Ներկայումս, աշխարհում արագ զարգացող փոքր հիդրոէլեկտրակայաններին ներկայացվում են շինմոնտաժային, տեխնիկական և տնտեսական, ինչպես նաև էկոլոգիական բնույթի պահանջներ: Փոքր հիդրոէլեկտրակայանի հիդրոագրեգատի երկրաչափական չափերի ճիշտ ընտրությունն ապահովում է ցածր զանգվածագաբարիտային պարամետրեր, հիդրոագրեգատի և ամբողջ համակարգի արժեք, շինմոնտաժային ծախսեր: Այդպիսի նվազագայուն զանգվածագաբարիտային պարամետրերով հիդրոագրեգատը կարելի է կոչել «կոմպակտ»: Կոմպակտ հիդրոագրեգատի բաղկացուցիչ հանգույցներն ապահովում են նաև համակարգի հարաբերական բարձր կայունությունը և, ըստ անհրաժեշտության, հնարավորություն են տալիս լուծել օպտիմիզացիայի խնդիրներ:

Աշխատանքի նպատակը:

• Հիդրոագրեգատի համակարգի նվազագույն մասագաբարիտային չափերը և արժեքը, բարձր կայունությունն ու արդյունավետությունն ապահովող կոմպակտ հիդրոագրեգատի նախագծում և հետազոտում:

• Սինքրոն հիդրոագրեգատի դեմպֆերային համակարգի նախագծում և հետազոտում:

• Փոքր հիդրոէլեկտրակայանի սինքրոն գեներատորի աշխատանքային ռեժիմների բարելավում:

• Դեմպֆերային համակարգի կիրառմամբ ապահով թողարկման, ինչպես նաև հանկարծակի վթարային ռեժիմների դեպքում արագության սահմանափակման ապահովում:

Գիտական նորույթը:

1. Մշակված է փոքր հիդրոէլեկտրակայանի կոմպակտ հիդրոագրեգատի կառուցվածքային լուծում, որն ապահովում է համեմատաբար բարձր տեխնիկատնտեսական պարամետրեր:

2. Մշակված է փոքր հզորության հիդրոագրեգատի արտաքին դեմպֆերային համակարգ, որը նպաստում է տատանումների նվազմանը, կայուն աշխատանքի մեծացմանը և սինքրոն գեներատորի աշխատանքի ռեժիմի բարելավմանը:

3. Մշակված է արտաքին դեմպֆերային համակարգի հաշվարկային մեթոդիկա:

4. Բերված է արտաքին դեմպֆերային համակարգի էլեկտրական և մագնիսական պարամետրերի բարելավման մոտեցում, որը հնարավորություն կտա ապահովել ամբողջ հիդրոագրեգատի անհրաժեշտ պարամետրերը՝ համաձայն պատվիրատուի տեխնիկական առաջադրանքին:

Եզրակացություն:

1. Փոքր հիդրոէլեկտրակայանի էներգետիկ հանգույցի և դրանում կիրառվող սինքրոն գեներատորի աշխատանքային ռեժիմներին և աշխատանքի կայունության բարձրացմանը նվիրված հայտնի աշխատությունների վերլուծության արդյունքում հիմնավորվել են փոքր հիդրոէլեկտրակայանի սինքրոն գեներատորի աշխատանքային ռեժիմների բարելավման հիմնական ուղղությունները:

2. Փոքր հիդրոէլեկտրակայանի սինխրոն գեներատորի աշխատանքային ռեժիմների բարելավման սկզբունքների վերլուծության միջոցով և աշխատանքի կայունությունը բարձրացնելու անհրաժեշտությունից ելնելով բացահայտվել են սինխրոն գեներատորի աշխատանքի արդյունավետության վրա ազդող գործոնները:

3. Մշակվել է փոքր հիդրոէլեկտրակայանի սինքրոն գեներատորի տատանողական պրոցեսի մաթեմատիկական մոդել, որը հնարավորություն է տալիս որոշել սինքրոն հիդրոագրեգատի դեմպֆերացման և սինքրոն կոշտության գործակիցները և դրանց անհրաժեշտ մեծության ապահովմամբ նվազեցնել անցումային պրոցեսի ժամանակը և տատանումների ամպլիտուդը:

4. Մշակվել է բարձր տեխնիկատնտեսական ցուցանիշներով կոմպակտ հիդրոագրեգատի կառուցվածքային լուծում, որի կիրառությունը փոքրացնում է կոմպլեքսի զբաղիտային չափերը, ինչն առավել արդյունավետ է լեռնային հատվածներում փոքր հիդրոէլեկտրակայանի կառուցման պարագայում: Կոմպակտ հիդրոագրեգատի նախագծման բերված մոտեցումը հնարավորություն է տալիս ընտրել հիդրոտուրբինի պտտման օպտիմալ արագությունը՝ ապահովելով համակարգի առավելագույն օգտակար գործողության գործակիցը:

5. Մշակվել և նախագծվել է սինքրոն հիդրոագրեգատի արտաքին դեմպֆերային համակարգ, որը հանդիսանալով զանգվածային ռոտորով ապինքրոն մեքենա համանման է սինքրոն գեներատորի ներքին դեմպֆերային փաթույթին, ապահովում է մեծ դեմպֆերացման գործակից և տատանումների փոքր ամպլիտուդ, ինչպես նաև հիդրոագրեգատի համակարգի կայուն աշխատանք:

6. Մշակվել է արտաքին դեմպֆերային համակարգի նախագծման հաշվարկային մեթոդիկա, ստացված հաշվարկային արդյունքները համեմատվել են փորձնական տվյալների հետ:

7. Ստեղծված հաշվարկային մեթոդիկայի հիման վրա մշակվել է արտաքին դեմպֆերային համակարգի ավտոմատացված նախագծման ծրագրային ապահովում .Net միջավայրում աշխատող C# ծրագրավորման լեզվով, որը հնարավորություն է տալիս նախագծել արտաքին դեմպֆերային համակարգը՝ հիմքում ունենալով կոմպակտ հիդրոագրեգատի բաղկացուցիչ մաս կազմող թափանցիկ երկրաչափական չափերը:

IMPROVING THE OPERATION MODES OF HPP GENERATORS

SUMMARY

Synchronous hydro aggregates used in small hydropower plants, as a rule, have small weight and size parameters. At different transient processes in the hydropower system (asymmetrical modes, emergency modes) stability change occurs which is expressed by fluctuation of rotating units of the hydro aggregate regarding the synchronous speed and by an increase in losses in some units. The arising oscillations become a reason for a decrease in the quality of the generated electricity. As it is known, damping windings are used in synchronous generators to increase stability and decrease the oscillations. These oscillations depend on the rotating masses (inertia moments) and on the moments, which occur and try to keep the system in the synchronous mode.

At present, construction, technical and economic, as well as environmental requirements are imposed on rapidly developing small hydropower plants (SHHPs) in the world. The correct selection of geometrical dimensions of the hydro aggregate of a small hydropower plant ensures low weight and size parameters, the cost of the hydrogenerator and the entire system, as well as construction costs. Such a hydro aggregate with low weight and size parameters can be called “compact”. The components of a compact hydro aggregate also ensure relatively high stability of the system, and, if necessary, allow to solve the optimization issues.

The goal of the dissertation is:

- to develop a compact hydro aggregate, ensuring minimal weight and size parameters and cost, high stability and profitability of the hydro aggregate system;
- to investigate and develop the synchronous generator damping system;
- to improve the small hydropower plant synchronous generator operation modes;
- to ensure the safe start of the synchronous hydro aggregate by using a damping system, as well as restriction of the runaway speed at sudden emergency modes.

Scientific novelty.

1. A structure of a compact hydro aggregate for a small hydropower plant is developed, ensuring relatively high technical- and -economic indices;
2. An external damping system for a low power hydro aggregate is developed, favouring the decrease in the oscillations, the increase in the stable operation and the improvement of the synchronous generator operation mode;
3. A method for calculating the external damping system is developed;
4. An approach to improve the electric and magnetic parameters of the external damping system is proposed, allowing to ensure the required parameters of the whole hydro aggregate in accordance with the technical task.

The main conclusions.

1. As a result of analyzing the known works devoted to the power unit of a small hydropower plant and improvement of the operation modes and the stable

operation of the synchronous generator used in it, the main directions of improvement of the operation modes of the SHPP synchronous generator are substantiated.

2. Based on the principles of improving the operation modes of the small hydropower plant synchronous generator, and also based on the need of stable operation, the indices affecting the efficiency of the synchronous hydro aggregate are revealed.

3. A mathematical model of the synchronous generator oscillation process is developed, which gives an opportunity to determine the damping coefficient and the synchronous stiffness coefficient, and by ensuring the required value, to reduce the time of the transient process and the amplitude of oscillations.

4. A constructive solution of a compact hydro aggregate with high technical- and -economic indices is developed. The application of such a hydro aggregate decreases the dimensions of the complex, which is more profitable when the small hydropower plant is built in mountainous areas. The given method of the compact hydro aggregate design gives an opportunity to select the optimal speed of the turbine and ensure the maximal efficiency of the system.

5. An external damping system for the synchronous hydro aggregate is developed and designed. That system is an asynchronous machine with a massive rotor and, like the synchronous generator internal damping winding, ensures a relatively high damping coefficient and a low amplitude of oscillations, as well as the stable operation of the hydro aggregate.

6. A calculation method for designing the external damping system is developed. The obtained results are compared with the experimental data.

7. Based on the developed calculation method, a software for the external damping system automatic design is developed by the programming language C# working in the .Net environment. The program gives an opportunity to design an external damping system based on the geometrical sizes of one of the hydro aggregate components – flywheel.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. V. K.', written in a cursive style.