

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИВОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАЕМ ДЛЯ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ ТЭС

Бочкарев И. В., Келебаев К. К.

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, e-mail: elmech@mail.ru

RESEARCH DRIVE ASYNCHRONOUS MOTORS WITH BILATERAL SUPPLY FOR TURBOMECHANISMS TPP

Bochkarev I.V, Kelebaev K.K.

Kyrgyz State Technical University I.Razzakova Bishkek, Kyrgyzstan, e-mail: elmech@mail.ru

Предложен новый закон регулирования АДДП и проведены исследования выходных показателей двигателя при различных законах регулирования реактивной мощностью

A new law regulating ADDP and conducted research output of the engine at various laws regulating reactive power.

В различных установках ТЭС широко используются различные турбомеханизмы (ТМ) - насосы, вентиляторы, компрессоры, дымососы и т.п. Наиболее рациональным способом улучшения технико-экономических показателей ТМ является регулирование их режимов работы посредством регулируемого электропривода [1]. При этом в качестве приводного электродвигателя целесообразно использовать асинхронный двигатель с двухсторонним питанием (АДДП), к обмотке ротора которого через контактные кольца подводится регулируемое напряжение [2]. Для питания роторной цепи АДДП можно использовать непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) различных типов. При высоких тактовых частотах на входе преобразователя (т.е. пульсности) выходное напряжение по форме приближается к напряжению управления. Таким образом, анализ систем с преобразователями значительно упрощается, если принять, что пульсность НПЧ бесконечна. Выходное напряжение в этом случае не имеет пульсаций и повторяет по форме напряжение управления. Расчетные соотношения, полученные в результате такого допущения, дают приемлемые для практики результаты [3].

Анализ АДДП показывает, что при заданных значениях частоты вращения двигателя и момента нагрузки можно получить различные режимы работы привода, которые зависят от параметров подводимого к ротору напряжения, а именно, от его амплитуды U_2 и фазы δ относительно напряжения статора. Это объясняется тем, что в АДДП имеется возможность регулирования реактивной мощности со стороны статора Q_1 и ротора Q_2 . Проведенный анализ показал, что наиболее характерными способами регулирования параметров режимов работы АДДП являются следующие [4]:

- регулирование при реактивной мощности $Q_2 = 0$, что обеспечивает минимальную требуемую мощность ПЧ;
- регулирование при реактивной мощности $Q_1 = 0$, что обеспечивает повышение коэффициента мощности АДДП;
- регулирование по минимуму электрических потерь $\Delta P = \min$.

Проведенный анализ показал, что для создания одного и того же магнитного потока в АДДП со стороны ротора требуется меньшая реактивная мощность, чем со стороны статора. Поэтому можно предложить еще один способ регулирования реактивной мощности в АДДП – регулирование при номинальном ток ротора $I_2 = I_{2H} = \text{const}$. При таком способе во всем диапазоне регулирования частоты вращения необходимо обеспечить значение реактивной составляющей тока ротора I_{2y} , в соответствии с выражением

$$I_{2y} = \sqrt{I_{2H}^2 - I_{2x}^2}, \quad (1)$$

где I_{2x} – активная составляющая тока ротора, изменяющаяся при изменении нагрузки.

При этом обеспечиваются наиболее высокие суммарные энергетические показатели во всем рабочем диапазоне ТМ. Тогда из уравнений электрического равновесия АДДП [4] реактивный ток статора равен

$$I_{1y} = \frac{r_1 I_{1x} - \omega_1 L_m I_{2y} - U_1}{\omega_1 L_m}, \quad (2)$$

где U_1 – напряжение статора; r_1 – активное сопротивление фазы статора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; I_{1x} – активный ток статора; ω_1 – угловая частота электромагнитного поля статора.

Значения составляющих векторов токов двигателя при пренебрежении активным сопротивлением статора были получены в [4] в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} I_{1x} &= \frac{U_1 k_s k_r s x_r r_2}{x_s (r_2^2 + s^2 x_r^2 \sigma^2)} \left[1 - \frac{U_{2*}}{s} \left(\cos \delta + \frac{s x_r \sigma}{r_2} \sin \delta \right) \right]; \\ I_{1y} &= - \frac{U_1 (r_2^2 + s^2 x_r^2 \sigma)}{x_s (r_2^2 + s^2 x_r^2 \sigma^2)} \left[1 + \frac{k_s k_r r_2 x_r}{r_2^2 + s^2 x_r^2 \sigma} U_{2*} \left(\sin \delta - \frac{x_r s \sigma}{r_2} \cos \delta \right) \right]; \\ I_{2x} &= - \frac{U_1 k_s s r_2}{r_2^2 + s^2 x_r^2 \sigma^2} \left[1 - \frac{U_{2*}}{s} \left(\cos \delta + \frac{x_r \sigma s}{r_2} \sin \delta \right) \right]; \\ I_{2y} &= \frac{U_1 k_s s^2 x_r \sigma}{r_2^2 + s^2 x_r^2 \sigma^2} \left[1 + \frac{U_{2*}}{s} \left(\cos \delta - \frac{r_2}{s x_r \sigma} \sin \delta \right) \right]; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $I_{1x}, I_{1y}, I_{2x}, I_{2y}$ – проекции векторов токов статора и ротора на оси x, y ; r_1, r_2 – активные сопротивления фазы статора и ротора; $U_{1x}, U_{1y}, U_{2x}, U_{2y}$ – проекции векторов напряжений статора и ротора на синхронные оси:

$$U_{x1} = U_1; \quad U_{y1} = 0; \quad U_{x2} = U_2 \cos \delta; \quad U_{y2} = U_2 \sin \delta. \quad (4)$$

Электромагнитный момент АДДП равен

$$M = \frac{3x_\mu}{2\omega_1} p_n (I_{y1} I_{x2} - I_{x1} I_{y2}), \quad (5)$$

где p_n – число пар полюсов машины.

С учетом (4) выражение (5) примет вид:

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{U_{1m}^2 k_s^2 s r_2}{\omega_1 (r_2^2 + s^2 x_r^2 \sigma^2)} \left[1 - \frac{U_{2*}}{s} \left(\cos \delta + \frac{s x_r \sigma}{r_2} \sin \delta \right) \right]. \quad (6)$$

В установившемся режиме вращающий момент двигателя уравнивается моментом сопротивления ТМ, который для удобства совместного решения с (6) запишем через скольжение s ротора АДДП:

$$M = \frac{C_n H_c + \left(\frac{1-s}{1-s_n}\right)^2}{\eta_n(\omega, H_c)} \sqrt{1 - \frac{H_c}{H_o} \left(\frac{1-s}{1-s_n}\right)^2}, \quad (7)$$

где $C_n = 1 - 1/H_o$ – коэффициент; H_o – напор насоса при расходе $Q = 0$; H_c – статический напор, который равен разности давлений в начале и в конце трубопровода; $\omega = 2\pi f_1(1-s)/p$ – угловая скорость вращения ротора; f_1 – частота питающей сети; p – число пар полюсов; s и s_n – текущее и номинальное скольжение ротора; η_n – номинальное значение КПД ТМ.

Если АДДП работает на приводной механизм, имеющий постоянный момент сопротивления, то возможность регулирования реактивной мощности в АДДП ограничена и для ее реализации требуется повышенная мощность двигателя. Однако для механизмов, момент нагрузки которых существенно зависит от скорости вращения рабочего органа, этого не требуется. Именно к таким механизмам относятся ТМ, у которых момент имеет квадратичную зависимость от скорости. Регулирование режима работы АДДП обеспечивается путем изменения параметров напряжения, подводимого к ротору двигателя от НПЧ – действующего значения U_2 и фазы δ . Величины U_2 и δ , которые соответствуют конкретному режиму работы ТМ, вычисляются путем совместного решения уравнений токов и момента АДДП. Алгоритм расчета функций регулирования U_2 и δ при регулировании реактивной мощности привода ЦН по предложенному способу $I_2 = I_{2H}$ приведен на рис.1, а результаты расчета токов АДДП для этого случая показаны на 2.а.

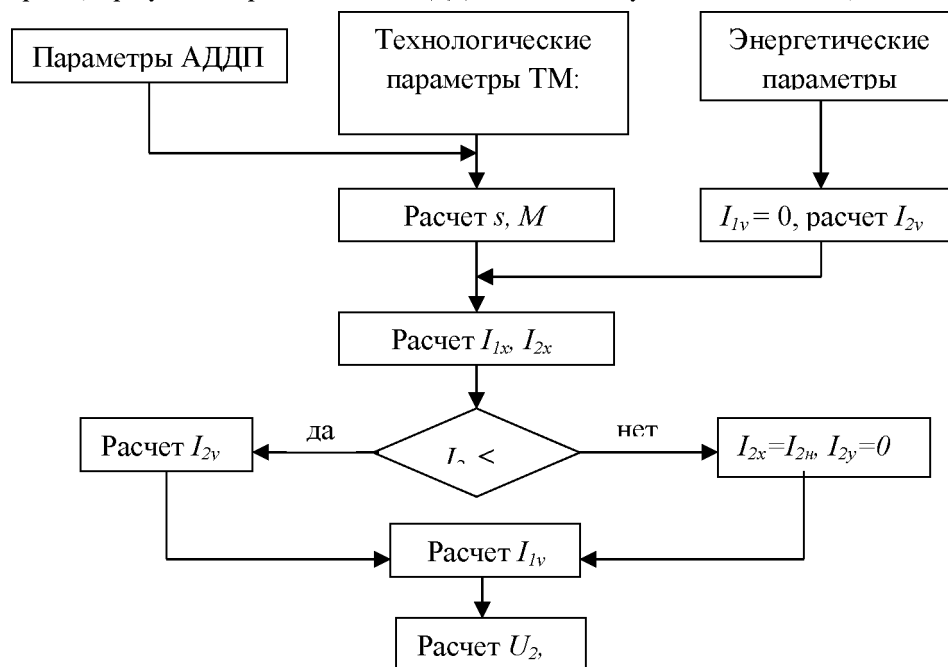


Рис. 1. Алгоритм расчета функций при регулировании по $I_2 = I_{2H}$

Расчет проведен для АДДП мощностью 200 кВт при $H_c = 0$ и относительной подаче насоса $1 < Q^*_{нас} < 0,615$, что соответствует диапазону регулирования $0,025 < s < 0,4$. Здесь обозначено $Q^*_{нас} = Q_{нас} / Q_{ном.нас}$, где $Q_{ном.нас}$ – номинальная подача насоса. Очевидно, что если двигатель недогружен по моменту, то получаем $Q_1 > 0$, т.е. статор выдает реактивную мощность в сеть. Как показал расчет (см. рис.2,а), для рассматриваемого АДДП такой режим имеет место при $s < 0,11$. Это соответствует регулированию подачи насоса в пределах $Q^*_{нас} < 0,913 Q_{ном.нас}$.

Расчет при других способах регулирования производится аналогично. Например, для обеспечения режима, при котором реактивная мощность, потребляемая со стороны статора, равна нулю $Q_1 = 0$, величины U_2 и δ находятся из решения уравнения реактивного тока статора при моменте двигателя,

$$I_{1y}(U_2, \delta, s) = 0 \quad (8)$$

вычисляем по выражению (6). На базе совместного решения этих двух уравнений с учетом (7) можно определить значения U_2 и δ , которые соответствуют требуемой подаче (или напору) ТМ. Результаты расчета токов АДДП при законе регулирования по закону $Q_1 = 0$ показаны на рис.2.б. Видно, что магнитный поток при $s > 0,1$ создается реактивным током ротора I_{2y} . Таким образом, система управления в значительном интервале регулирования скорости поддерживает $I_{y1} = 0$.

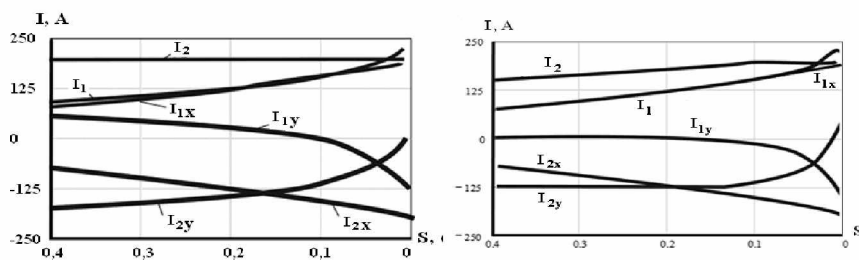


Рис. 2. Токи АДДП при регулировании

При увеличении частоты вращения момент нагрузки увеличивается. Соответственно, возрастают активные составляющие токов статора I_{1x} и ротора I_{2x} .

Результаты расчетов показали, что суммарная активная мощность, потребляемая АДДП, определяется нагрузкой и практически не зависит от закона регулирования. Результаты расчетов реактивной мощности представлены на рис. 3. Видно, что минимальная реактивная мощность потребляется при регулировании по закону $I_2 = I_{2н}$. При $Q_1 = 0$ потребление реактивной мощности в зоне скольжений ротора $s = 0,15 \div 0,3$ увеличивается примерно на 40 %, а при регулировании по $\Delta P = \min$ – в 3,4 раза. При регулировании по $Q_2 = 0$ привод потребляет наибольшую реактивную мощность. Это соответствует свойствам АДДП, поскольку частота тока ротора равна $f_2 = s f_1$, т.е. значительно меньше частоты сети f_1 , и для создания требуемого магнитного потока при таком законе регулирования требуется большая реактивная мощность.

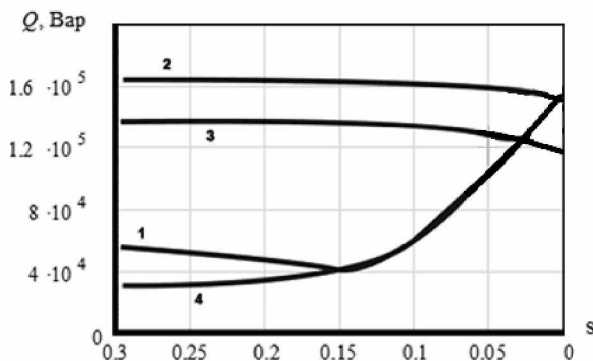


Рис.3. Реактивная мощность, потребляемая АДДП:
1 – при $Q_1=0$; 2 – при $Q_2=0$; 3 – при $\Delta P = \min$; 4 – при $I_2 = I_{2н}$

Литература

1. Бочкарев И. В., Келебаев К. К., Хворостыяная Е. В. Регулируемый электропривод как основа энергосбережения в области электроэнергетики // Известия КГТУ, 2011, № 25. – С. 113-117.
2. Бочкарев И. В., Келебаев К. К. Разработка энергосберегающего электропривода для центробежных насосов // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Мат-лы Всероссийской НТК. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2010. – С. 238-240.
3. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей. – Л.: Энергия, 1973. – 248 с.
4. Келебаев К. К. Исследование электромагнитных процессов в электроприводе с машиной двойного питания для центробежных насосов // Известия КГТУ. – 2009. – № 19. – С. 38-42.

НОВЫЙ СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ АВТОНОМНОЙ МИКРОГЭС

*Иманакунова Ж. С.
КГТУ им. И. Раззакова*

Рассматривается новый способ стабилизации частоты автономной микроГЭС, с использованием маховика с регулируемым моментом инерции и массой, предлагается уравнения движения ротора машины.

This article is devoted to a new type of frequency stabilization autonomous mini HPS using fly wheel with regulating moment of inert ion and mass. Equation of machine rotor motion is also given in this article.

В последние годы во всем мире в связи с уменьшением запасов органического топлива и обострением проблем экологии, возрос интерес к использованию природных возобновляемых энергоресурсов. Среди них существенное место занимает энергия потоков воды.

ВКР гидроэлектростанции могут устанавливаться практически на любых водотоках: от небольших ручьев до крупных рек, а в предгорных районах наиболее перспективным является использование простых по конструкции и дешёвых микроГЭС.

Частота вращения гидроагрегата может существенно изменяться в зависимости от колебаний величины нагрузки и энергии рабочего потока воды. Следовательно, особое внимание при создании микроГЭС, необходимо обращать на системы стабилизации ее рабочих режимов, к которым относятся параметры выходного напряжения, характеризующиеся номинальной величиной и частотой. Поэтому, важнейшим элементом энергоустановки является система стабилизации, обеспечивающая статически устойчивый режим работы гидроагрегата и стабилизацию его выходного напряжения.

В соответствии с классификацией, проведенной в работе [1], электромеханические системы преобразования энергии потоков воды в электроэнергию необходимого качества можно условно разделить на пять основных классов:

- 1) системы со стабилизацией частоты вращения гидротурбины путем воздействия на элементы гидротехнического оборудования;
- 2) системы, в которых между гидродвигателем и генератором устанавливаются приводы постоянной скорости, позволяющие стабилизировать частоту вращения электрической машины;
- 3) системы, осуществляющие стабилизацию частоты выходного напряжения с помощью специальных конструкций электрических машин – генераторов стабильной частоты при переменной частоте вращения;
- 4) системы с использованием статических преобразователей частоты, преобразующих напряжение генератора с переменной частотой вращения;
- 5) системы, построенные на принципе регулирования тормозного момента генератора с помощью введения дополнительной регулируемой нагрузки.

Уравнение движения системы «гидротурбина–генератор» имеет вид[1]:

$$M_m = M_r + J \frac{d\Omega}{dt},$$

или

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{мх} - M_э, \quad (1)$$

где соответственно $M_{мх}$ –механический момент, развиваемый гидротурбиной; $M_э$ – момент сопротивления генератора (электрический момент), Н·м, действующие на вал; J – момент инерции вращающихся частей, кг·м²; θ – угол между валом и неподвижной осью, рад. Поскольку рассматриваемая синхронная машина является генератором, механический момент $M_{мх}$ является ускоряющим, а электрический момент $M_э$ – тормозящим.

Угол можно отсчитывать относительно синхронно вращающейся оси, имеющей постоянную угловую скорость $\omega_{ном}(\omega_0)$, тогда [2]

$$\theta = (\omega_0 t + \alpha) + \delta_{мх}, \quad (2)$$

где α – постоянный угол, определяемый сдвигом в пространстве выбранной синхронно вращающейся оси.

Из (2) видно, что в (1) $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ можно заменить на $\frac{d^2\delta_{мх}}{dt^2}$, в результате чего это выражение принимает вид:

$$J \frac{d^2 \delta_{\text{мх}}}{dt^2} = M_{\text{мх}} - M_{\text{э}}, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{мх}}$ – механический угол по отношению к синхронно вращающейся оси, рад.

Умножив обе части выражения (3) на $\omega_{\text{мх}}$, получим [2]:

$$J \omega_{\text{мх}} \frac{d^2 \delta_{\text{мх}}}{dt^2} = P_{\text{мх}} - P_{\text{э}}, \quad (4)$$

Записав (4) через электрический угол и в относительных единицах, имеем [3]:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_0 (P_{\text{мх}*} - P_{\text{э}*}),$$

где T_J – в секундах; δ – в радианах; ω_0 – синхронная скорость 1/сек; – в секундах; $P_{\text{мх}*}$ и $P_{\text{э}*}$ – в отн. ед.

Обозначив $P_{\text{мх}*}$ через P_0 и учитывая, что $P_{\text{э}*} = P_{\text{м}} \sin \delta$ [3], получим:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_0 (P_0 - P_{\text{м}} \sin \delta). \quad (5)$$

Сравнительный анализ способов получения необходимого качества электроэнергии и величин, входящих в уравнения движения системы «гидротурбина–генератор» (1), показывает, что стабилизация частоты вращения осуществляется путем воздействия на величину M_m , или на M_r , или путем использования:

- привода постоянной скорости;
- специальной конструкции электрической машины;
- статического преобразователя частоты.

В статье авторов (К. Сатаркулов, А. Бакасова, Ж. С. Иманакунова, Г. Н. Ниязова) предложен новый способ стабилизации частоты автономной микроГЭС (мощность порядка до 10 кВт). Принцип стабилизации основан на изменении значения момента инерции гидротурбины путем использования маховика с автоматически регулируемой массой и моментом инерции и регулирования энергии потока воды, поступающего на входы напорного трубопровода (рис. 1).

Способ стабилизации частоты автономной микроГЭС реализуется следующим образом.

Поток воды 12 поступает во входное отверстие напорного трубопровода 1 и при выходе этого потока 11 из выходных его отверстий возникает реактивная отдача. В результате, ротор генератора 2 и маховик 4, приходят во вращательное движение.

При этом следует отметить, что предварительно полость маховика не заполнена водой, так как клапаны 6 закрыты, препятствуя поступлению воды в полость маховика, а клапаны 5 открыты. Это состояние соответствует номинальной частоте вращения.

При превышении частоты вращения ротора выше номинального из-за уменьшения нагрузки генератора, металлические шарики 9, жестко соединенные с соответствующими рычагами 8, которые в свою очередь шарнирно связаны с корпусом маховика, под действием центробежных сил поднимаются выше.

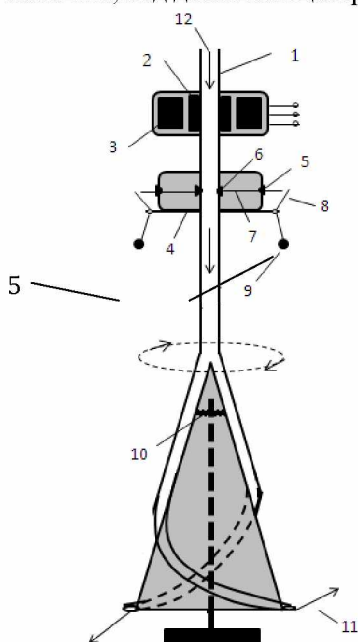


Рис. 1. МикроГЭС: 1 – напорный трубопровод; 2 – ротор генератора, жестко прикрепленный к напорному трубопроводу; 3 – статор; 4 – маховик со следующими элементами (5, 6 – клапаны, 7 – спица, 8 – рычаг, шарнирно связанный с корпусом маховика, 9 – металлический шар, жестко прикрепленный к рычагу); 10 – подшипник; 11 – поток воды, выходящий из продолжения напорного трубопровода; 12 – поток воды, поступающий в напорный трубопровод гидротурбины.

При этом рычаги 8 механически воздействуют на клапаны 5 и 6, так что клапаны 6 открываются, способствуя поступлению воды в полость маховика из напорного трубопровода, а клапаны 5 закрываются. Так как масса и момент инерции маховика увеличиваются, а поток воды, поступающий на выходы напорного трубопровода, уменьшается, то скорость вращения ротора понижается до достижения номинальной частоты.

При уменьшении частоты, ниже допустимой, за счет опускания шаров 9 клапаны 6 закрываются, а клапаны 5 открываются, и поток воды, поступающий на выходные отверстия, увеличивается. В результате частота восстанавливается до допустимого значения.

Относительно небольшие проектные мощности микроГЭС позволяют создавать физические модели с масштабным коэффициентом подобия, близким к единице. Поэтому, на таких моделях можно проводить всестороннее исследование многих блоков и элементов микроГЭС, которые впоследствии могут быть использованы в неизменном виде на реальных станциях.

В данной статье предложена математическая модель микроГЭС с новым способом стабилизации частоты, в предположении, что сконструирован маховик, механическая постоянная T_J которого функционально связана с углом сдвига ротора следующим выражением:

$$T_J(1 + K \cdot \sin\delta) \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0(P_0 - P_m \sin\delta), \quad (6)$$

где K – константа, значение которой определяется конструкцией маховика.

Заключение. Предложенная математическая модель позволит определить оптимальные параметры, схемы построения и законы управления стабилизирующей системой. Для анализа за режимами работы станции в переходных и установившихся режимах работы путем решения нелинейного дифференциального уравнения (6) рекомендуется использовать прикладную программу Simulink.

Литература

1. Лукутин Б. В. Автономное электроснабжение от микрогидро-электростанций / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов, Е. Б. Шандарова. - Томск, 2001. - 104 с.
2. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / Пер. с англ. под ред. Я. Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с., ил.
3. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях / Под ред. В. А. Веникова, изд. 2-е, дополненное. - М.-Л., Энергия, 1967. - 456 с., с илл.
4. Проблемы управления автоматике - 2014.

УДК.: 621.186.4

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Саньков В. И., Жапакова Б.С.

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
г. Бишкек, Кыргызстан, e-mail:burul.japakova@mail.ru*

CAPABILITY OF USING HEAT - INSULATING MATERIALS.

Sankov V. I., Japakova B. S.

*Kyrgyz State Technical University I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan,
e-mail:burul.japakova@mail.ru*

В статье рассматривается применение нового теплоизоляционного материала "Изоллат" и приводятся результаты исследований на ТЭЦ г. Бишкек.

In article went over of using new heat insulating materials „ISOLAT" and results of investigations on Bishkek heat station are included.

Введение: Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является одной из приоритетных задач в развитии экономики. Существенная роль в решении проблемы энергосбережения принадлежит высокоэффективной промышленной тепловой изоляции. Тепловая изоляция трубопроводов и оборудования определяет техническую возможность и экономическую эффективность реализации технологических процессов и широко применяется в энергетике, ЖКХ, нефтеперерабатывающей, пищевой и других отраслях промышленности. В энергетике объектами тепловой изоляции являются паровые котлы, паровые и газовые турбины, теплообменники, баки-аккумуляторы горячей воды, дымовые трубы. Тепловая изоляция обеспечивает возможность проведение технологических процессов при заданных параметрах, позволяет со-

При этом рычаги 8 механически воздействуют на клапаны 5 и 6, так что клапаны 6 открываются, способствуя поступлению воды в полость маховика из напорного трубопровода, а клапаны 5 закрываются. Так как масса и момент инерции маховика увеличиваются, а поток воды, поступающий на выходы напорного трубопровода, уменьшается, то скорость вращения ротора понижается до достижения номинальной частоты.

При уменьшении частоты, ниже допустимой, за счет опускания шаров 9 клапаны 6 закрываются, а клапаны 5 открываются, и поток воды, поступающий на выходные отверстия, увеличивается. В результате частота восстанавливается до допустимого значения.

Относительно небольшие проектные мощности микроГЭС позволяют создавать физические модели с масштабным коэффициентом подобия, близким к единице. Поэтому, на таких моделях можно проводить всестороннее исследование многих блоков и элементов микроГЭС, которые впоследствии могут быть использованы в неизменном виде на реальных станциях.

В данной статье предложена математическая модель микроГЭС с новым способом стабилизации частоты, в предположении, что сконструирован маховик, механическая постоянная T_J которого функционально связана с углом сдвига ротора δ следующим выражением:

$$T_J(1 + K \cdot \sin\delta) \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0(P_0 - P_M \sin\delta), \quad (6)$$

где K – константа, значение которой определяется конструкцией маховика.

Заключение. Предложенная математическая модель позволит определить оптимальные параметры, схемы построения и законы управления стабилизирующей системой. Для анализа за режимами работы станции в переходных и установившихся режимах работы путем решения нелинейного дифференциального уравнения (6) рекомендуется использовать прикладную программу Simulink.

Литература

1. Лукутин Б. В. Автономное электроснабжение от микрогидро-электростанций / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов, Е. Б. Шандарова. - Томск, 2001. - 104 с.
2. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / Пер. с англ. под ред. Я. Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с., ил.
3. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях / Под ред. В. А. Веникова, изд. 2-е, дополненное. - М.-Л., Энергия, 1967.- 456 с., с илл.
4. Проблемы управления автоматике - 2014.