

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКЕ С АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

М.Л. Костырев, О.А. Воеводина

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: kostyrev39@mail.ru

Рассматривается задача совершенствования автономных энергоустановок с асинхронными генераторами. Предложены математические модели для исследования динамических режимов. Приведены результаты компьютерного моделирования, предложены решения по обеспечению требуемого качества генерируемой электроэнергии.

Ключевые слова: микроГЭС, асинхронный генератор, автобалласт.

В качестве генераторов в микроГЭС, ветроэнергетических и бензоэлектрических, сварочных, импульсных и других автономных установках нашли применение как синхронные, так и асинхронные генераторы. Асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором проще, дешевле и надежнее, но требуют устройства для их возбуждения и регулирования. Возбуждение асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором осуществляется с помощью конденсаторов или вентильного преобразователя [1, 2]. К настоящему времени выполнен ряд обширных исследований в этой области электромеханики. Рассмотрена физическая картина конденсаторного самовозбуждения, сформулирован ряд критериев и условий самовозбуждения, предложены методы определения границ области устойчивой работы, созданы конденсаторы с малой удельной массой, реализованы различные варианты управляемых источников реактивной мощности и регуляторов напряжения на базе силовых интегральных полупроводниковых модулей. Вместе с тем требует более глубокого исследования динамика процесса конденсаторного самовозбуждения, сброса-наброса нагрузки с учетом эффекта насыщения магнитопровода и влияния механической характеристики первичного двигателя. Рассмотрим эти процессы на примере микроГЭС. Современная микроГЭС [3, 4] содержит гидротурбину, генератор и автобалластную нагрузку (рис. 1).

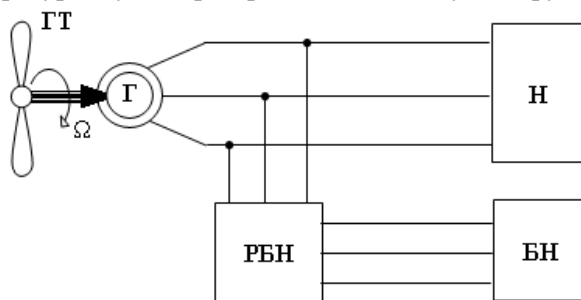


Рис. 1. Функциональная схема микроГЭС:
ГТ – гидротурбина; Г – генератор; Н – полезная нагрузка; БН – автобалластная нагрузка;
РБН – регулятор автобалластной нагрузки

Михаил Леонидович Костырев (д.т.н., проф.), профессор каф. теоретических основ электротехники.

Олеся Алексеевна Воеводина, аспирант.

Нерегулируемые быстроходные гидротурбины пропеллерного типа нашли наиболее широкое применение в микроГЭС. Уравнение механической характеристики такой гидротурбины имеет вид [3]

$$M_T = 1,2M_{НОМ} - \frac{0,18M_{НОМ}\omega_T^2}{\omega_{НОМ}^2}, \quad (1)$$

где $M_{НОМ}$, $\omega_{НОМ}$ – номинальный момент и частота вращения.

Развитие общей теории электрических машин показало, что для описания поведения в электромеханической системе электрическую машину удобно рассматривать как совокупность магнитосвязанных электрических цепей с сосредоточенными параметрами. При таком подходе электрическая машина описывается в общем случае системой дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами, для исключения которых применяют различные координатные преобразования. Выбор новой системы координат определяется особенностями конкретной схемы, режимами работы машины, целью исследований. Для моделирования трехфазного асинхронного генератора, обмотка статора которого соединена звездой с изолированной нейтралью, используем уравнения асинхронной машины в прямоугольной системе координат dq, вращающихся со скоростью ω_k [1]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{sd}}{dt} &= u_{sd} - i_{sd}R_s + \omega_k\psi_{sq}; \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} &= u_{sq} - i_{sq}R_s - \omega_k\psi_{sd}; \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} &= -i_{rd}R_r + (\omega_k - \omega)\psi_{rq}; \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} &= -i_{rq}R_r - (\omega_k - \omega)\psi_{rd}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь потокосцепления:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd}; \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq}; \\ \psi_{rd} &= L_m i_{sd} + L_r i_{rd}; \\ \psi_{rq} &= L_m i_{sq} + L_r i_{rq}. \end{aligned}$$

Напряжения и токи в старой и новой системе координат связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \sin \vartheta & \sin \vartheta - \sqrt{3} \cos \vartheta \\ 2 \cos \vartheta & \cos \vartheta + \sqrt{3} \sin \vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\cos \vartheta + \sqrt{3} \sin \vartheta & -\sin \vartheta - \sqrt{3} \cos \vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix}; \\ i_{sc} &= -i_{sa} - i_{sb}. \end{aligned}$$

Электромагнитный момент:

$$M = \frac{3}{2} (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}). \quad (3)$$

Уравнение механического равновесия:

$$M_T = M + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

где J – момент инерции вращающихся частей ротора и гидротурбины.

Насыщение магнитной цепи асинхронной машины определяется воздействием как поля основной гармоники воздушного зазора, так и полей рассеяния. Большая часть магнитных линий полей рассеяния замыкается по магнитопроводу. В асинхронной машине с насыщенной зубцовой зоной это, в конечном счете, приводит к уменьшению как главных индуктивностей, так и индуктивностей рассеяния. Однако при исследовании асинхронного генератора достаточно учесть только насыщение от поля основной гармоники, так как при работе в замкнутой системе регулирования перегрузки по току обычно не превышают двукратных и дополнительное насыщение магнитопровода от полей рассеяния несущественно. Для учета насыщения вводим в исходные данные кривую намагничивания

$$U = f(I_\mu),$$

полученную расчетным или опытным путем.

Уравнение для активно-емкостной нагрузки для фазы А статора

$$U_{sa} = \frac{1}{C} \int (i_{sa} - i_{RH}) dt, \quad (5)$$

где активный ток нагрузки

$$i_{RH} = \frac{u_{sa}}{R_H}.$$

Аналогично формируются уравнения для фаз В и С. В общем случае нагрузка по фазам может быть несимметричной.

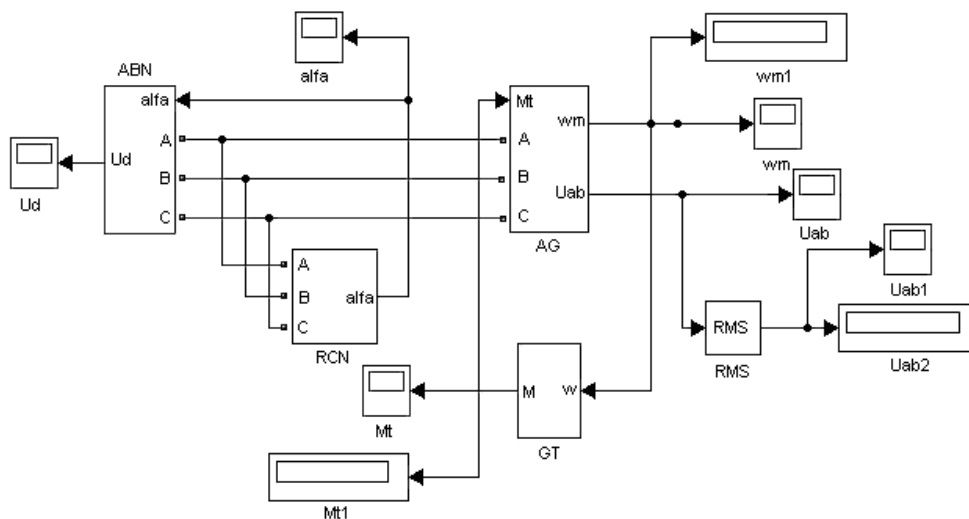


Рис. 2. Компьютерная модель микроГЭС

Автобалластная нагрузка состоит из управляемого тиристорного выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме с активной нагрузкой в цепи постоянного тока. Тиристоры моделировались как управляемые ключи с учетом порогового напряжения и динамического сопротивления в открытом состоянии. Угол открыва-

ния тиристоров формировался пропорционально току нагрузки с поправкой на отклонение от заданного напряжения.

По уравнениям (1-5) была сформирована компьютерная модель микроГЭС (рис. 2) и исследована динамика процессов самовозбуждения генератора и сброса-наброса нагрузки. Исследовались переходные процессы и качество генерируемой электроэнергии микроГЭС с параметрами¹: номинальная мощность $P_{НОМ}=10$ кВт, номинальное линейное напряжение $U_{НОМ}=400$ В, номинальная частота $f_{НОМ}=50$ Гц, параметры схемы замещения асинхронной машины: $R_1=0,69$ Ом, $R_2=0,27$ Ом, $X_1=1,04$ Ом, $X_2=1,37$ Ом, емкость конденсатора $C=250$ мкФ, балластное сопротивление $R=28$ Ом. Кривая намагничивания $U=[191; 267; 343; 419; 457; 495]$ В, $I_{\mu}=[3,48; 5; 6,66; 9,78; 14,28; 23,67]$ А.

В результате исследований установлено, что в процессе конденсаторного самовозбуждения асинхронного генератора возникают перенапряжения, наиболее значительные в режиме холостого хода генератора. Причина их появления заключается в увеличении магнитного потока и частоты вращения ротора в процессе раскрутки гидротурбины. Рост магнитного потока, а значит и перенапряжений, ограничивается насыщением магнитопровода (рис. 3, 4, 5).

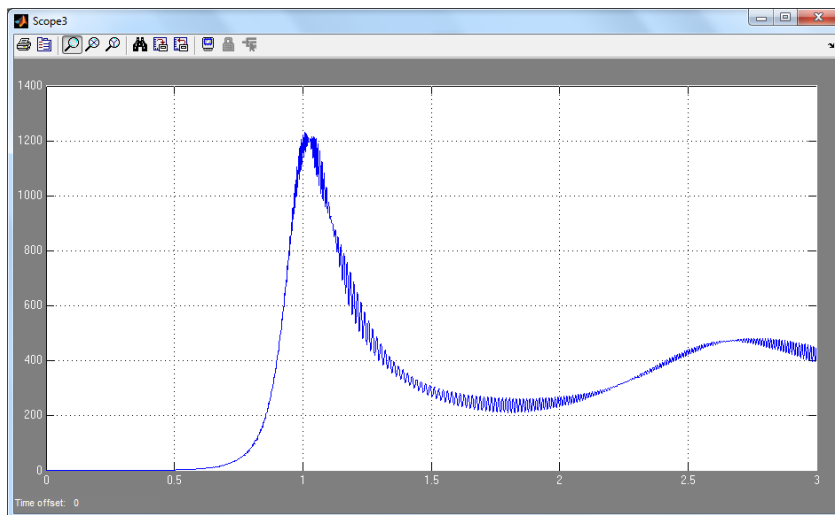


Рис. 3. Действующее значение линейного напряжения в процессе самовозбуждения без учета насыщения при холостом ходе

Нарастание частоты вращения ротора зависит от механической характеристики гидротурбины и нагрузки генератора. Исследования показали, что амплитуда перенапряжений не зависит от начального значения частоты вращения ротора. Запуск микроГЭС при неподвижном вале генератора отличается от аналогичного запуска при номинальной частоте вращения вала генератора лишь тем, что при нем установившийся режим наступает позже.

При использовании нерегулируемой гидротурбины ограничить перенапряжения позволяет автобалластная нагрузка. Установлено, что при правильной настройке автобалластной нагрузки удается снизить перенапряжения с $2U_{НОМ}$ до $1,7U_{НОМ}$. Полно-

¹ Исследование на компьютерной модели выполнил магистрант А.П. Балакин.

стью устранить перенапряжения не удастся, и они должны учитываться при выборе конденсаторов, регулятора автобалласта и эксплуатации микроГЭС.

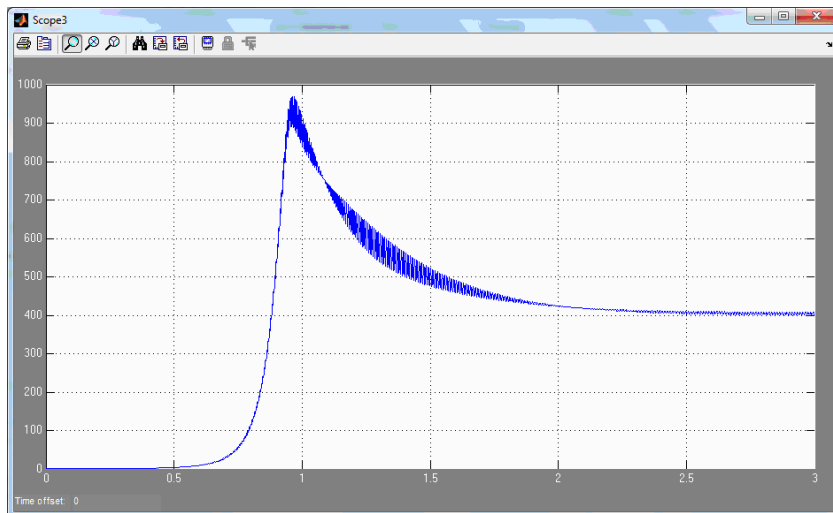


Рис. 4. Действующее значение линейного напряжения в процессе самовозбуждения с учетом насыщения при холостом ходе

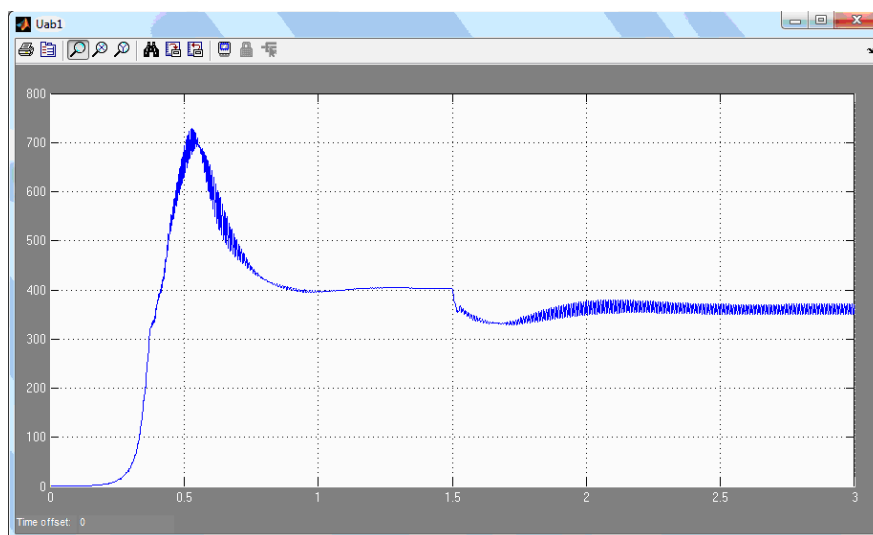


Рис. 5. Действующее значение линейного напряжения при набросе номинальной нагрузки

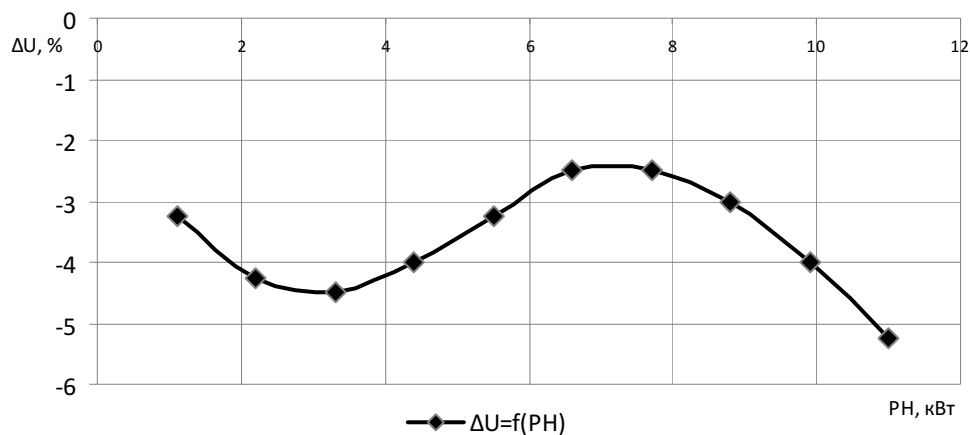


Рис. 6. Отклонения линейного напряжения ΔU (%) от номинального значения в зависимости от мощности нагрузки P_H

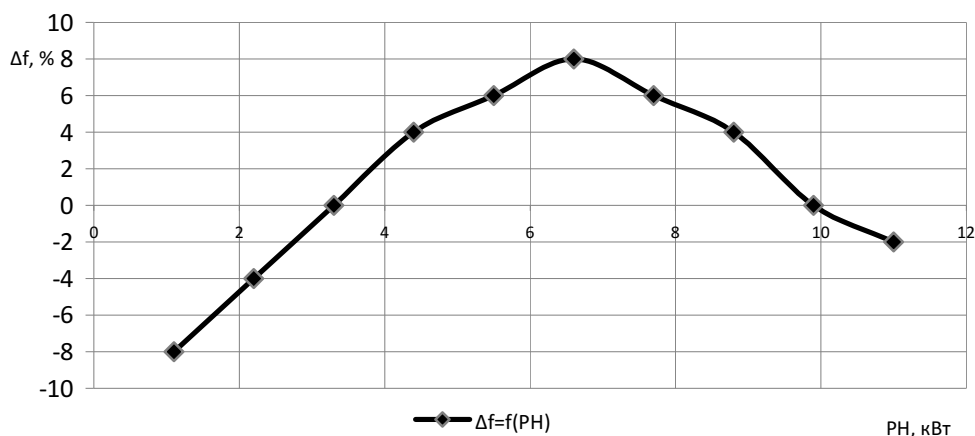


Рис. 7. Отклонения частоты на выходе генератора Δf (%) от номинального значения в зависимости от мощности нагрузки P_H

Исследования качества генерируемой электроэнергии показали, что при автобалластном регулировании отклонения амплитуды напряжения не превышают 6 %, а частоты – 8 % (рис. 6, 7). Искажение синусоидальной формы напряжения несущественно, что объясняется фильтрующими свойствами конденсаторов и асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором. Для высших временных гармоник он находится в режиме, близком к короткому замыканию.

Заключение. В процессе конденсаторного самовозбуждения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором возникают кратковременные перенапряжения, наиболее значительные в режиме холостого хода. Они ограничиваются насыщением магнитопровода. Подключение регулируемой автобалластной нагрузки позволяет снизить перенапряжения и обеспечить стабилизацию напряжения и частоты в допустимых пределах. Для улучшения стабилизации частоты необходимо дополнительное регулирование емкости конденсаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Костырев М.Л., Скороспешкин А.И.* Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 160 с. – ISBN- 5-283-00666-2.
2. *Торопцев Н.Д.* Асинхронные генераторы автономных систем. – М.: Знак, 1997. – 288 с. – ISBN- 5-87789-025-5.
3. *Лукутин Б.В., Сипайлов Г.А.* Использование механической энергии возобновляемых природных источников для электроснабжения автономных потребителей. – Фрунзе.: Илим, 1987. – 135 с.
4. *Лукутин Б.В., Обухов С.Г.* Микрогидроэлектростанция с автобалластной нагрузкой, регулируемой по частоте выходного напряжения // *Электромеханика*. – 1990. – № 6. – С. 111-119.

Статья поступила в редакцию 22 марта 2012 г.

TRANSIENTS IN INDEPENDENT POWER INSTALLATION WITH INDUCTION GENERATOR

M.L. Kostyrev, O.A. Voevodina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The improvement of the independent installations with the induction generators is considered in the paper. The mathematical models for the research of dynamic modes are offered. The results of computer modeling are given, the decisions on ensuring the demanded quality of the generated electric power are offered.

Keywords: *microhydroelectric power station, induction generator, autballast.*

*Michail L. Kostyrev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Olesya A. Voevodina, Postgraduate student.*