

УДК 681.513.1

## СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МИКРОГЭС С ДИСКРЕТНЫМ НЕСИММЕТРИЧНЫМ БАЛЛАСТОМ

Шандарова Е.Б.

*ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, e-mail: shandarovaelena@mail.ru*

В статье рассмотрена микрогидроэлектростанция, в состав которой входит синхронный генератор с секционированной обмоткой якоря. Стабилизация рабочих режимов станции осуществляется автобалластной системой, построенной на управляемых вентилях. Показано, что одним из нормальных режимов работы станции является несимметричный режим, степень несимметрии которого определяется несимметрией эквивалентной нагрузки генератора. Установлена зависимость максимальной степени несимметрии от числа отпаяк обмотки синхронного генератора и вида несимметрии. Показано, что максимальная степень несимметрии напряжений зависит от числа отпаяк и изменяется от 3,2% при трех отпайках до 1% при девяти и мало зависит от типа несимметрии. Рассмотрена логика построения системы управления несимметричной автобалластной системы, реализованная на базе комбинационных логических схем, управляемых по сигналам датчика тока полезной нагрузки станции.

Ключевые слова: микрогидроэлектростанция, синхронный генератор, якорная обмотка, секция обмотки, балластная нагрузка, качество напряжения, несимметрия напряжений

## SYSTEM STABILIZATION OF THE OUTPUT VOLTAGE OF THE MICRO HPP WITH DISCRETE DISSYMMETRY BALLAST

Shandarova E.B.

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: shandarovaelena@mail.ru*

In the paper micro Hydro Power Plant, which includes a synchronous generator with armature winding taps has been conducted. Stabilization of operating modes station carried thyristor auto ballast system. It is shown that one of the normal modes of the station is a dissymmetry modes, the degree of dissymmetry is determined by the dissymmetry of the equivalent load generator. The dependence of the maximum degree of dissymmetry from the number of taps of the winding of the generator and the type of dissymmetry has been established. It is shown that the maximum degree of dissymmetry is dependent on the number of taps, and varies from 3,2% for three taps to 1% for nine and practically independent on the type of dissymmetry. The logic of construction of the control system of dissymmetry auto ballast system, implemented on the basis of combinational logic circuits controlled by signals of the current sensor payload station was considered.

Keywords: micro hydro power plant, synchronous generator, armature winding, section winding, ballast load, voltage quality, voltage unbalance

При создании микрогидроэлектростанций (микроГЭС) большое внимание уделяется системам стабилизации ее рабочих режимов. Если стабилизировать поток воды с помощью напорного трубопровода, то, выбирая соответствующую нагрузку источника электропитания, можно стабилизировать частоту вращения гидрогенератора. Стабилизация частоты вращения гидрогенератора станции, а, следовательно, и частоты его выходных электрических параметров, осуществляется автоматическим перераспределением электрической мощности между некоторыми потребителями, часть из которых допускает снижение величины питающего напряжения или его отключение («балластная нагрузка») с помощью системы стабилизации, которая обычно строится на управляемых вентилях [2, 5].

Достоинством данного способа является высокое быстродействие и полное исключение электромеханических устройств из системы стабилизации частоты вращения гидродвигателя. Недостатки связаны с ограничением точности стабилизации результирующей нагрузки микроГЭС за счет временных изменений величины и характера полезной нагрузки станции, которые не удастся полностью скомпенсировать управляемым балластом. Соответственно, качество генерируемого напряжения имеет ограничения [1].

Применение в микроГЭС генераторов специальных конструкций позволяет улучшить гармонический состав напряжения, регулировку которого осуществляет тиристорная система автобалластного типа. Как показали исследования [3], улучшить качество выходного напряжения и упростить конструкцию системы стабилизации напряжения станции возможно, выполнив якорную обмотку генератора с  $n$  отпайками в соответствии с рис. 1, где  $\Delta e_1, \dots, \Delta e_n$  – ЭДС соответствующих секций обмотки генератора;  $\Delta L_{r1}, \dots, \Delta L_{rn}$ ;  $\Delta r_{r1}, \dots, \Delta r_{rn}$  – индуктивность и активное сопротивление соответствующих секций обмотки;  $R_6$  – сопротивление балластной нагрузки;  $n$  – число секций обмотки якоря.

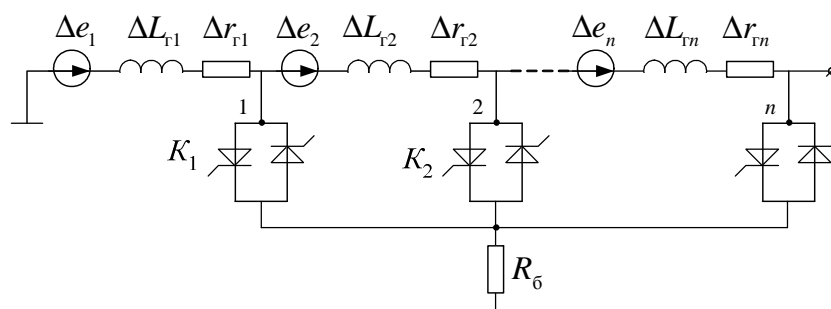


Рис. 1. Эквивалентная схема фазы машинно-вентильного генератора с секционированной обмоткой якоря

Дискретное подключение балластного резистора к соответствующим отпайкам обмотки позволяет регулировать мощность балласта без искажений формы кривых токов и напряжений генератора, характерных для фазорегулирующей автобалластной системы стабилизации напряжения микроГЭС.

Для получения равномерной шкалы мощностей балласта необходимо выполнить отпайки в точках обмотки, квадраты действующих значений напряжений в которых отличаются на постоянную величину, определяющую шаг дискретизации балластной мощности. Следовательно, мощность, рассеиваемая на балласте, изменяется в зависимости

от места его подключения к отпайкам обмотки  $P_{6k} = \frac{U_k^2}{R_6}$ , где  $U_k$  – действующее значение

напряжения в  $k$ -ой точке обмотки. Для более плавной регулировки балластной мощности систему стабилизации целесообразно строить таким образом, чтобы минимальная величина

мощности, на которую может измениться балластная нагрузка гидроагрегата, составляла  $\frac{P}{3n}$ , что соответствует подключению балласта к отпайке одной фазы генератора с минимальным напряжением. Следовательно, в этом случае принципиально допускается существование в системе несимметричных режимов.

Подключение балластной нагрузки к нужному выводу обмотки якоря производится по сигналам датчика тока полезной нагрузки  $I_H$ . При уменьшении  $I_H$  от номинального значения до нуля происходит последовательное подключение балластной нагрузки к выводам (1, 2...n) обмотки якоря при достижении тока нагрузки значения срабатывания тиристорных ключей  $K_1...K_n$ . Две другие фазы имеют аналогичное устройство. Следовательно, если допустить степень несимметрии суммарной нагрузки  $1/9$  мощности генератора, то схема с тремя отпайками позволяет получить 9 ступеней мощности балласта при возможности компенсировать несимметрию станции с точностью до интервала дискретизации балласта. Возможные варианты эквивалентных схем системы электроснабжения приведены на рис. 2, а, б.

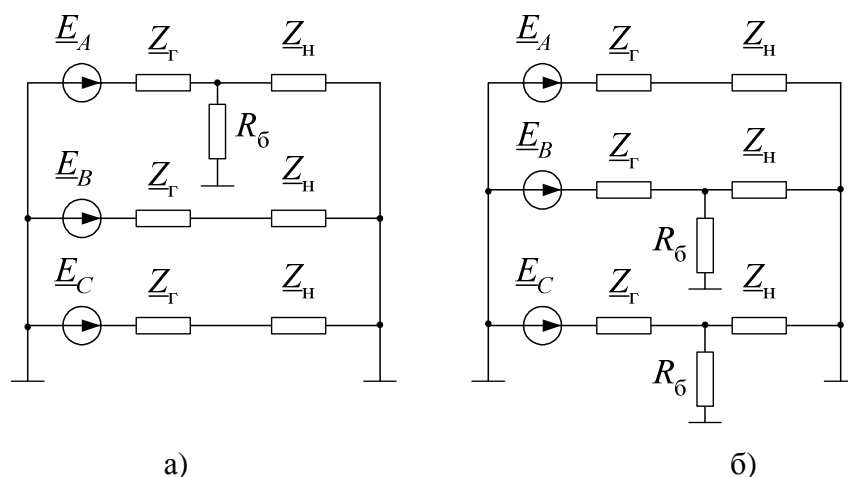


Рис. 2. Расчетные схемы для несимметричных режимов работы

На рисунках симметричная часть эквивалентной нагрузки генератора, включающая полезную нагрузку и балласт, обозначается как  $Z_H$ . Несимметричная часть нагрузки, равная минимальной дискретной величине изменения балласта обозначена как  $R_6$ . Несимметричная загрузка фаз генератора определяет несимметрию его напряжений. Однако если величина отклонений напряжения в каждой фазе лежит в пределах погрешности стабилизации (в соответствии с ГОСТ), то подобная несимметрия допустима.

Для определения степени несимметрии напряжений в автономной системе электроснабжения в зависимости от величины  $\frac{P}{3n}$  использовался метод симметричных

составляющих. Напряжения генератора прямой  $\underline{U}_1$ , обратной  $\underline{U}_2$  и нулевой  $\underline{U}_0$  последовательностей для схемы, представленной на рис. 2, а равны

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{E}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3R_6)}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3R_6}; \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{E} \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3R_6}; \quad \underline{U}_0 = \frac{\underline{E} \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3R_6};$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{r1} \cdot \underline{Z}_H}{\underline{Z}_{r1} + \underline{Z}_H}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{r2} \cdot \underline{Z}_H}{\underline{Z}_{r2} + \underline{Z}_H}; \quad \underline{Z}_0 = \frac{\underline{Z}_{r0} \cdot \underline{Z}_H}{\underline{Z}_{r0} + \underline{Z}_H},$$

где  $\underline{Z}_{r1}$ ,  $\underline{Z}_{r2}$ ,  $\underline{Z}_{r0}$  – сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности синхронного генератора станции,  $\underline{E}$  – действующее значение ЭДС фазы генератора.

Для варианта схемы, показанного на рис. 2, б напряжения равны

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_0 = \frac{\underline{E}(\underline{Z}_2 + R_6) \cdot (\underline{Z}_0 + R_6)}{(\underline{Z}_2 + R_6) \cdot (\underline{Z}_0 + R_6) + (\underline{Z}_1 + R_6) \cdot (\underline{Z}_0 + R_6) + (\underline{Z}_2 + R_6) \cdot (\underline{Z}_1 + R_6)}.$$

Фазные напряжения генератора определяются как

$$\underline{U}_A = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_1 \cdot e^{j240} + \underline{U}_2 \cdot e^{j120} + \underline{U}_0; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_1 \cdot e^{j120} + \underline{U}_2 \cdot e^{j240} + \underline{U}_0.$$

Результаты расчетов несимметричных режимов системы для двух вариантов несимметрии приведены на рис. 3, 4. На рисунках представлены зависимости разности между модулями фазных напряжений генератора от количества отпаек на якорной обмотке при  $n=3,6,9$ . В данных расчетах значения параметров  $\underline{Z}_{r1}$ ,  $\underline{Z}_{r2}$ ,  $\underline{Z}_{r0}$  приняты максимальными для синхронных генераторов рассматриваемого диапазона мощностей – до 100 кВт – и в относительных единицах (о.е.) равны соответственно  $\underline{Z}_{r1} = 0,4 + 1,2j$ ,  $\underline{Z}_{r2} = 0,005 + 0,35j$ ,  $\underline{Z}_{r0} = 0,02 + 0,3j$ . Сопротивление нагрузки принято активным, что в значительной степени характерно для бытовых нагрузок, питаемых от микроГЭС.

Как следует из зависимостей, представленных на рисунках, максимальная степень несимметрии напряжений зависит от числа отпаек и изменяется от 3,2% до 1% при  $n=3$  и  $n=9$  и мало зависит от типа несимметрии. Для минимальных значений параметров генератора ( $\underline{Z}_{r1} = 0,2 + 0,933j$ ,  $\underline{Z}_{r2} = 0,002 + 0,12j$ ,  $\underline{Z}_{r0} = 0,002 + 0,02j$ ) степень несимметрии составляет от 1,7% до 0,4% при  $n=3$  и  $n=9$ .

Несимметрия напряжений по ГОСТ 54149-2010 характеризуется коэффициентом обратной последовательности [4]  $K_{2U}$ , который представляет собой отношение действующего значения напряжения обратной последовательности  $U_2$  к номинальному значению междуфазного напряжения  $U_{ном}$ :

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100\%.$$

Допускаемая по ГОСТ 54149-2010 величина  $K_{2U}$  не должна превышать 4%. В данном случае коэффициент обратной последовательности удовлетворяет требованиям ГОСТа даже для систем «большой» энергетики.

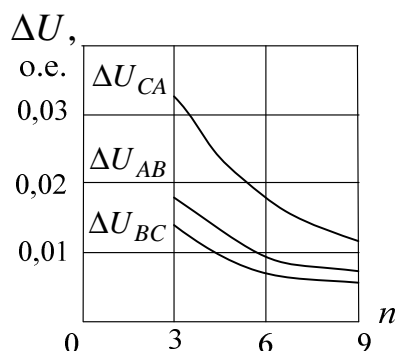


Рис. 3. Несимметрия в фазе A

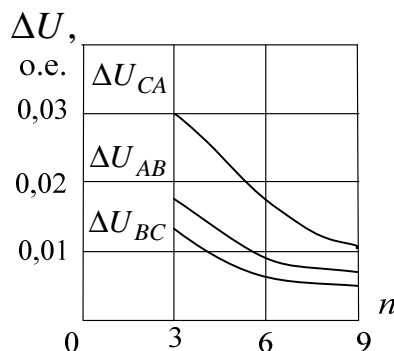


Рис. 4. Несимметрия в фазах B, C

Следует отметить, что при уменьшении индуктивного сопротивления обратной последовательности до минимальных значений максимальная степень несимметрии при  $n=3$  уменьшается с 3 до 1%.

Таким образом, уже 3 отпайки позволяют добиться приемлемых характеристик стабильности величины фазных напряжений. Стабилизация частоты вращения гидроагрегата с минимальным шагом дискретизации балластной мощности  $P/9$  может достигать точности  $\pm 24\%$  при использовании быстроходных нерегулируемых гидротурбин, что также является вполне приемлемым для энергоустановок.

Результаты расчетов несимметричных режимов подтверждаются экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке мощностью 3,6 кВт,  $U_{ном} = 127$  В,  $I_{ном} = 10$  А. Результаты эксперимента представлены в таблице. Степень несимметрии напряжений генератора экспериментального синхронного генератора не превышает 4% для условий эксперимента, соответствующих расчетным для схемы с тремя отпайками.

#### Действующие значения напряжений фаз генератора

Вид несимметрии	$U_A$ , В	$U_B$ , В	$U_C$ , В
Нагрузка фазы A составляет 2/3 номинальной	101	99,5	98,6
Нагрузка фаз A, B составляет 2/3 номинальной	105	105	100

Логика построения системы управления несимметричной автобалластной системы может быть реализована на базе комбинационных логических схем, управляемых по сигналам датчика тока полезной нагрузки станции (рис. 1). Например, для трехступенчатой

схемы при уменьшении тока нагрузки от номинального значения до нуля происходит последовательное подключение балластного резистора к выводам 1, 2, 3 обмотки якоря при достижении током нагрузки значений срабатывания тиристорных ключей, соответственно для фазы  $A$ :  $K_{1A}$ ,  $K_{2A}$  и  $K_{3A}$ . Для управления ключами датчик тока должен выдавать три сигнала  $X_{1A}$ ,  $X_{2A}$ ,  $X_{3A}$ , фиксирующих соответствующие значения фазного тока нагрузки, и суммарный сигнал от трех фаз генератора, превышающий порог срабатывания ключа  $X_{1ABC}$ .

Логические выражения, описывающие алгоритм работы системы автоматического управления одной из ступеней где  $X_{1A}$ ,  $X_{1B}$ ,  $X_{1C}$ ,  $X_{1ABC}$  – сигналы датчика тока, управляющие ключами  $K_{1A}$ ,  $K_{1B}$  и  $K_{1C}$  на первых отпайках якорных обмоток фаз генератора  $A$ ,  $B$ ,  $C$  могут быть представлены в виде

$$K_{1A} = X_{1A} \vee \overline{X_{1B}} \vee X_{1ABC} \vee \overline{X_{1C}} X_{1ABC}; \quad K_{1B} = X_{1B}; \quad K_{1C} = X_{1C} \vee X_{1A} \vee \overline{X_{1B}} X_{1ABC}. \quad (1)$$

С учетом выполнения условия невозможности одновременного подключения балластного резистора к двум и более отпайкам обмотки, выражения, описывающие логику работы ключей трех ступеней автобалластной системы стабилизации имеют вид:

третья ступень

$$K'_{3A} = K_{3A};$$

$$K'_{3B} = K_{3B}; \quad (2)$$

$$K'_{3C} = K_{3C};$$

вторая ступень

$$K'_{2A} = K_{2A} \overline{K'_{3A}};$$

$$K'_{2B} = K_{2B} \overline{K'_{3B}}; \quad (3)$$

$$K'_{2C} = K_{2C} \overline{K'_{3C}};$$

первая ступень

$$K'_{1A} = K_{1A} \overline{K'_{2A}};$$

$$K'_{1B} = K_{1B} \overline{K'_{2B}}; \quad (4)$$

$$K'_{1C} = K_{1C} \overline{K'_{2C}}.$$

Логика работы ключей второй  $K_{2A}$ ,  $K_{2B}$  и  $K_{2C}$  и третьей ступени балласта  $K_{3A}$ ,  $K_{3B}$  и  $K_{3C}$  описывается выражениями вида (1) в функции датчиков тока второй  $X_{2A}$ ,  $X_{2B}$ ,  $X_{2C}$  и третьей  $X_{3A}$ ,  $X_{3B}$ ,  $X_{3C}$  ступеней балласта. Логическая часть системы управления автобалласта может быть построена по выражениям (1)-(4) на комбинационных логических элементах, соответствующих условиям их применения в составе микроГЭС.

Следовательно, предложенный способ построения системы стабилизации выходного напряжения микроГЭС и алгоритм его реализации позволяют получить простую конструкцию станции, а также использовать в качестве балласта стандартные электронагревательные приборы соответствующей мощности.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «Исследование и разработка систем управления микрогидроэлектростанций для электроснабжения автономных потребителей», № 14-08-90106.*

### Список литературы

1. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в

децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.

2. Сурков М.А., Лукутин Б.В., Сарсикеев Е.Ж., Киушкина В.Р. Мировые тенденции в области построения автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] // Наукоедение. – 2012 - №. 4 – С. 1. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/42tvn412.pdf> .

3. Шандарова Е.Б., Баттулга Т.Т. Использование синхронного генератора со специальной конструкцией обмотки якоря для микроГЭС [Электронный ресурс] //Современные проблемы науки и образования, 2014. - № 2. – С. 1-6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/116-12660>.

4. Электронный фонд нормативной и правовой документации. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-54149-2010>.

5. Comparative analysis of circuits of autonomic power systems based on renewable sources Lukutin B.V., Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Comparative analysis of circuits of autonomic power systems based on renewable sources // Power Engineering: efficiency, reliability, safety. Selected Reports of all-Russian Scientific and Technical Conference, 2014. – P.22-29.

**Рецензенты:**

Лукутин Б.В., д.т.н., профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института НИ Томского политехнического университета, г. Томск;

Кабышев А.В., д.т.н., профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института НИ Томского политехнического университета, г. Томск.