

УДК 621.548; 621.313; 621.311.24; 622.22

**ПОЛИРЕЖИМНЫЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И МОЩНОСТИ****Бакенов К.А., Умбетов Е.С.***НАО «Алматинский университет энергетики и связи», Алматы,**e-mail: erumbetov64@mail.ru*

В статье приводится краткий обзор электрогенераторов применяемых в гидроэлектроустановках и описывается электрический генератор обеспечивающий работу станций при широком диапазоне изменения частоты вращения и мощности. Генератор обеспечивает постоянство напряжения и удовлетворительный коэффициент полезного действия при переменной частоте вращения. Приведен анализ характеристик разработанного генератора.

**Ключевые слова:** полирежимный электрогенератор, энергетика, характеристики**MULTIMODE GENERATOR WITH ADJUSTABLE CHARACTERISTICS OF SPEED AND POWER****Buoys K.A., Umbetov E.S.***Nonprofit corporation «Almaty University of Energy and Communication», Almaty,**e-mail: erumbetov64@mail.ru*

The article provides a brief overview of generators used in hidroelektroustanovkah and describes an electrical generator capable of operating stations in a wide range of speed and power. The generator provides a constant voltage and satisfactory efficiency with variable speed. An analysis of the characteristics of the developed generator.

**Keywords:** multimode electric, energy, characteristics

Механизация и электрификация повышает производительность и устойчивость развития. Особо остро эти вопросы стоят в удаленных сельских хозяйствах. Электрификация удаленных потребителей с малой мощностью от энергосистемы не эффективна. Автономные системы электроснабжения на основе неисчерпаемых источников энергии более конкурентоспособны. Ветроэнергетические установки и микро-гидроэлектростанции дешевле других энергоустановок, что делает их конкурентоспособными, не смотря на нестабильность.

Разработка автоматизированных микро-гидроэлектростанций (микро-ГЭС) требует проведения глубоких исследований. Изменение энергии водного потока и колебания нагрузки усложняют задачу обеспечения постоянства напряжения и частоты тока. Сложность и дороговизна управления водным потоком поступающего на гидродвигатель, вызвала тенденцию к упрощению гидротехнической части станции, что сопровождается повышением требований к электрической части.

Переходные процессы, вызванные нестабильностью энергии поступающей на ветродвигатель, протекают динамичнее, что также повышает требования к электрической части установок.

Основными требованиями к гидроэлектростанциям, работающим на автономную

нагрузку (микро-гидроэлектростанции) и ветроэлектростанциям являются [1-3]:

- способность работать при переменной частоте вращения и мощности;
- способность поддерживать постоянство напряжения и частоты тока независимо от мощности и частот вращения генератора;
- иметь повышенную живучесть, так как автономные установки имеют удаленное расположение, и должны вырабатывать электроэнергию при частичном повреждении до прибытия специалистов сервисной службы.

Эффективность работы микро-гидроэлектростанций зависит от оптимальной и согласованной работы турбины, электрогенератора и системы управления.

Уравнение, описывающее связь моментов генератора и турбины, имеет вид

$$M_T = M_r - J \frac{\partial \Omega}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $M_T$  – механический момент, развиваемый турбиной;  $M_r$  – момент, создаваемый генератором;  $J$  – момент инерции вращающихся частей установки;  $\Omega$  – частота вращения генератора.

Статическую устойчивость гидроустановки можно описать выражением [1]

$$e_{\Sigma} = e_r - e_g; \quad (2)$$

$$e_t = \frac{\partial M_t}{\partial \Omega} \frac{M_{t, \text{ном}}}{\Omega_{\text{ном}}}; \quad (3)$$

$$e_g = \frac{\partial M_g}{\partial \Omega} \frac{M_{g, \text{ном}}}{\Omega_{\text{ном}}}; \quad (4)$$

где  $e_t$ ,  $e_g$  – коэффициенты саморегулирования генератора и турбины;  $M_{t, \text{ном}}$ ,  $M_{g, \text{ном}}$  – номинальные моменты генератора и турбины.

Устойчивая работа системы «генератор – турбина» возможна при положительном значении суммарного коэффициента устойчивости, которые нужно обеспечить при поддержании постоянства напряжения у потребителя. Момент генератора зависит мощности и угловой скорости генератора.

Анализ электрической части известных конструкций микрогидро- и ветроэлектростанций показал, что в гидроэлектростанциях широкое применение нашли синхронные и асинхронные генераторы. Несмотря на более высокую стоимость и массогабаритные показатели, в установках малой и средней мощности синхронные машины используются чаще. Это объясняется простотой процесса возбуждения и меньшими потерями на возбуждение.

Все способы стабилизации выходного напряжения электроустановок с переменной частотой вращения и мощностью согласно [1-3] предлагается разбить на пять групп:

- системы со стабилизацией частоты вращения гидротурбины путем воздействия на элементы самой гидротурбины;
- системы с промежуточным звеном постоянной частотой вращения;
- системы с промежуточными электрическими машинами, обеспечивающими постоянство выходного напряжения;

– системы с промежуточными статическими преобразователями, выдающие переменный ток с постоянной величиной напряжения;

– системы, поддерживающие постоянство частоты вращения за счет регулирования тормозного момента при помощи балластной нагрузки.

Способы со стабилизацией частоты вращения снижают производительность турбин. Системы, использующие промежуточные преобразователи, поддерживающие постоянство величины напряжения при переменной частоте вращения обеспечивают большую производительность. Частота вращения и мощности изменяется в несколько раз, что усложняет задачу создания согласованного с турбиной генератора.

Сотрудниками Алматинского университета энергетики и связи создан вентильный генератор для электроустановок с широким диапазоном изменения частоты вращения и мощности [4-6].

Электрическая схема вентильного генератора приведена на рис. 1. Вентильный генератор состоит из синхронного генератора СГ и коммутируемого выпрямителя КВ. Якорная обмотка, которого выполнена из нескольких параллельных ветвей а1, а2. Параллельные ветви подключены к коммутируемому выпрямителю КВ. В коммутируемом выпрямителе параллельная ветвь подключается к своему выпрямителю, образуя соответствующее количество вентильных блоков. Вентильные блоки подключены параллельно к общей сети постоянного тока (аккумуляторная батарея). Коммутируемый выпрямитель обеспечивает последовательное или параллельное включение вентильных блоков.

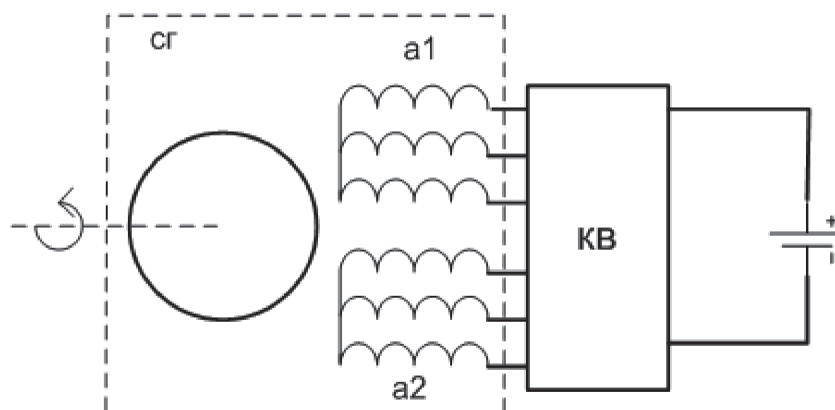


Рис. 1. Электрическая схема вентильного генератора

Последовательное включение параллельных ветвей (вентильных блоков) равносильно увеличению числа витков и уменьшению сечения обмотки якоря. Одним из преимуществ, применения коммутируемого выпрямителя, является изменение обмоточных данных вентильного генератора без применения механических элементов с использованием для этого относительно малое число коммутирующих элементов. Полупроводниковые элементы требуют меньше ухода, по сравнению с механическими коммутирующими элементами и повышают надежность вентильного генератора. Большое число последовательно включенных параллельных ветвей (меньшее сечение проводников обмотки якоря) используют на меньшей частоте вращения и мощности, что позволяет поддерживать оптимальное для этого режима плотность тока в обмотках генератора.

Параметры вентильного генератора и его способность согласованной работы, с каким либо приводом, определяется путем построения и анализа регулировочных, внешних характеристик и характеристик холостого хода. Учитывая особенности работы микрогидро- и ветродвигателей с использованием традиционных методик построения перечисленных характеристик определить способность согласованной работы вентильного генератора с ними не возможно. Поэтому автором вводятся специальные характеристики холостого хода, регулировочные и внешние характеристики. Специальная характеристика холостого хода определяет зависимость тока возбуждения  $I_b$  от частоты вращения  $n_r$ , при постоянстве выходного напряжения  $U_r = \text{const}$  и  $I_n = 0$ . Согласно теории электрических машин [7] выходное напряжение генератора  $U_r$  можно определить по выражению:

$$U_r = 4,44 \cdot f \cdot W_{\phi 1} \cdot \Phi = 4,44 \frac{pn}{60} W_{\phi 1} \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l \cdot B_{\delta} = 4,44 \frac{p \cdot \tau \cdot l \cdot \alpha}{60} W_{\phi 1} \cdot n \cdot B_{\delta} = K_r \cdot W_{\phi 1} \cdot n \cdot B_{\delta}, \quad (5)$$

где  $W_{\phi 1}$  – число эффективных витков в одной параллельной фазной ветви;  $B_{\delta}$  – индукция в воздушном зазоре;  $K_r$  – конструктивная постоянная генератора.

Из выражения (5), следует, что при уменьшении частоты вращения постоянство выходного напряжения можно поддерживать увеличением индукции в воздушном зазоре (тока возбуждения). Этот способ поддержания напряжения будет эффективен в узком диапазоне, из-за насыщения электротехнической стали.

В предлагаемом вентильном генераторе при снижении частоты вращения вентильные блоки включаются последовательно и выражение 5 можно переписать в следующем виде

$$U_r = U_1 + U_2 = 2W_{\phi 1}(K_r \cdot n \cdot B_{\delta}), \quad (6)$$

где 2 – количество параллельных ветвей.

Выходное напряжение вентильного генератора складывается из суммы последовательно включенных вентильных блоков, число которых определяется число параллельных ветвей.

При повышении мощности на валу генератора и частот вращения коммутируемым выпрямителем переключает вентильные

блоки параллельно и выражение напряжения принимает вид

$$U_r = U_1 = U_2 = K_r \cdot W_{\phi 1} \cdot n \cdot B_{\delta}. \quad (7)$$

Выражение (7) можно переписать в следующем виде:

$$U_r = a \cdot W_{\phi 1} \cdot K_r \cdot n \cdot B_{\delta}, \quad (8)$$

где  $a$  – число последовательно включенных вентильных блоков.

Коммутируемый выпрямитель изменяет число витков в параллельных ветвях якорной обмотки, что дает возможность поддерживать напряжение, при широком диапазоне изменения частоты вращения. Авторами были проведены расчеты характеристик вентильного генератора с шестью параллельными ветвями и четырьмя вариантами включения вентильных блоков (четырьмя ступенями). Выпрямленное напряжение 240 Вольт и мощностью от 200 Вт до 24 кВт.

На рис. 2 приведена специальная характеристика холостого хода. Характеристика состоит из четырех участков, каждый из которых соответствует определенной ступени коммутируемого выпрямителя.

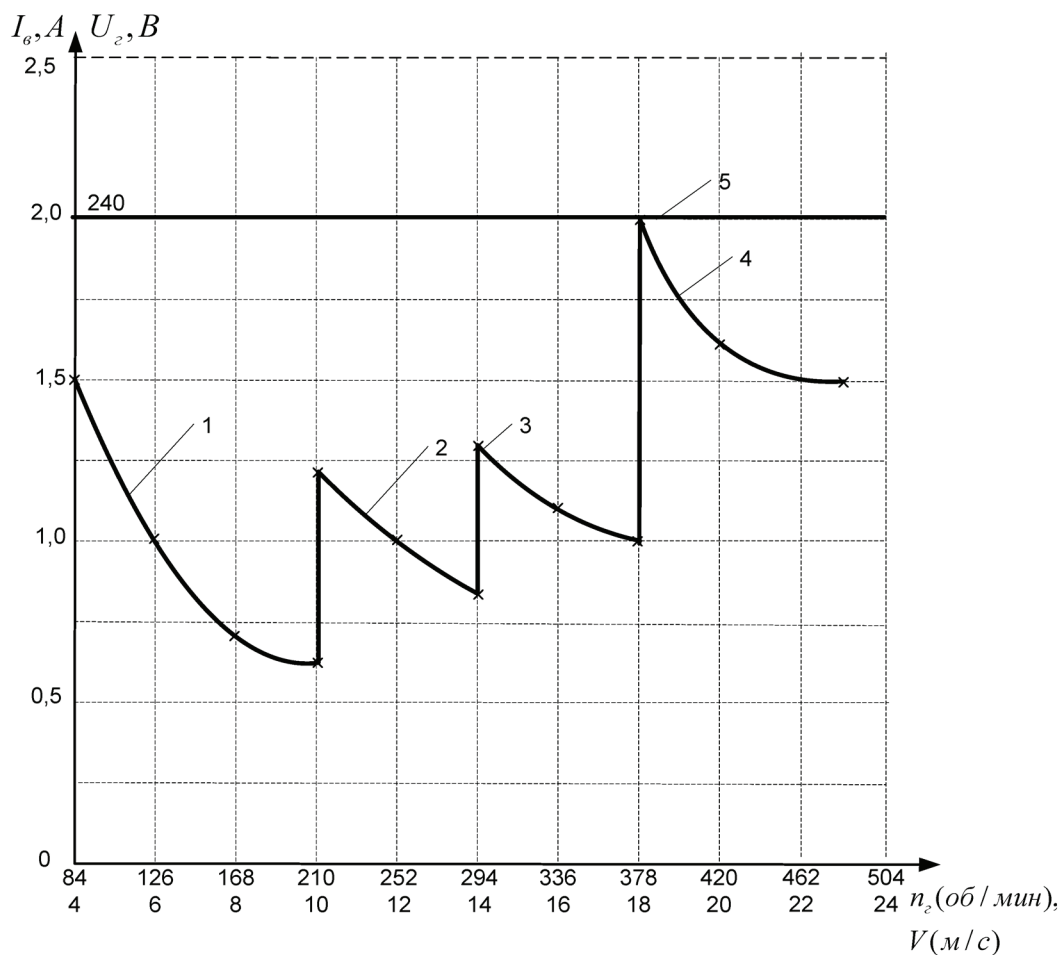


Рис. 2. Специальная характеристика холостого хода:  
1, 2, 3, 4 – кривые тока возбуждения при соответствующих ступенях коммутируемого выпрямителя, 5 – кривая напряжения

Из рисунка видно, что переключение ступени приводит к уменьшению тока возбуждения (уменьшению индукции в воздушном зазоре). Нелинейный характер кривой тока возбуждения отражает степень насыщения стали. На высоких и низких частотах вращения (кривые 1, 4) индукции в магнитной цепи номинальные (расчет-

ные) поэтому цепь быстро насыщается, вызывая нелинейность кривой тока возбуждения. На средних частотах вращения кривые тока возбуждения (2, 3) близки к линейным кривым.

На рис. 3 приведены специальные регулировочные характеристики для двух ступеней коммутируемого выпрямителя.

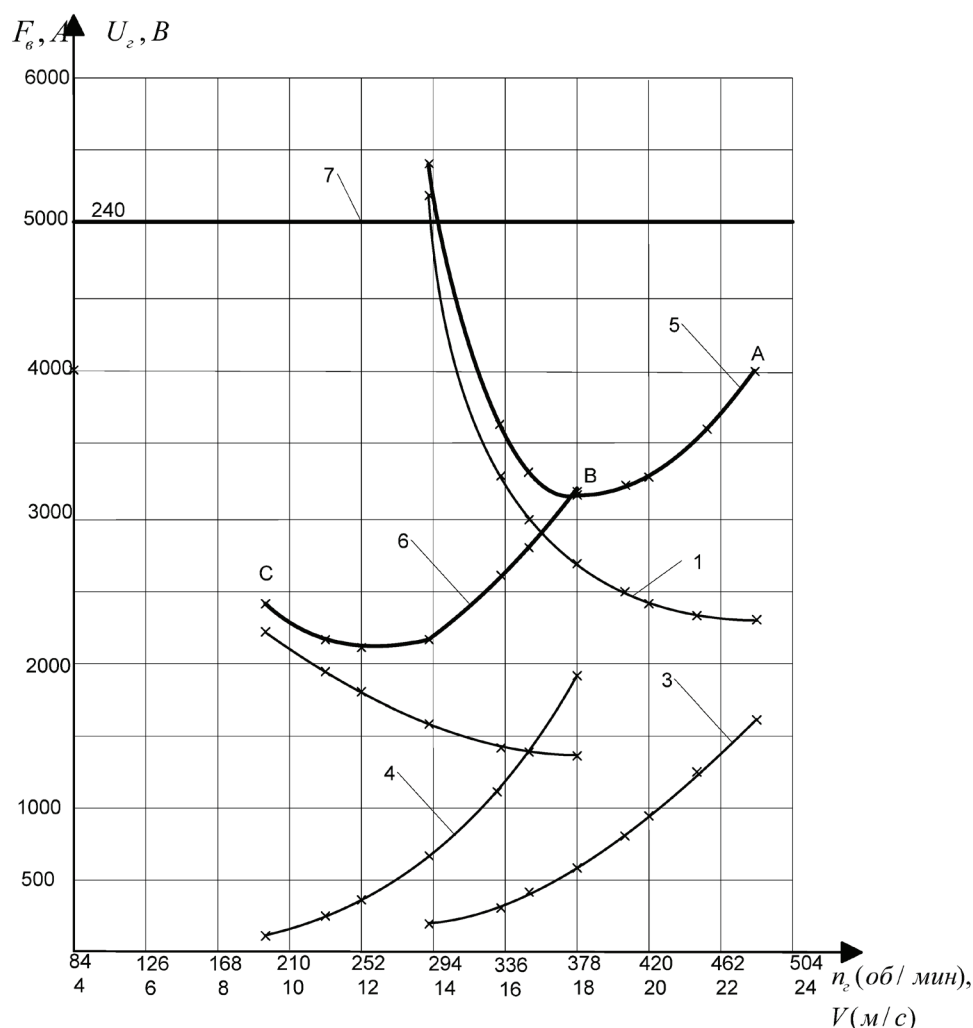


Рис. 3. Специальная регулировочная характеристика:

- 1, 2 – кривые зависимости продольных составляющих м.д.с. реакции якоря  $F_{ad}$ ;  
 3, 4 – кривые зависимости составляющих м.д.с. на магнитную цепь  $F_{\mu}$ ; 5, 6 – кривые  
 результирующих м.д.с. обмотки возбуждения; 7 – зависимость напряжения

При работе под нагрузкой результирующая м.д.с. обмотки возбуждения  $F_{\Sigma}$  складывается из двух основных слагаемых м.д.с. на магнитную цепь  $F_{\mu}$  и м.д.с. продольной составляющей реакции якоря  $F_{ad}$ . Зависимость результирующего тока возбуждения от частоты вращения и мощности нагрузки назовем специальной регулировочной характеристикой  $P, U, F$ . Мощность генератора изменяется в соответствии с кубической зависимостью от скорости ветра. Кривая мощности на рисунке не приведена. Зависимости продольной составляющей м.д.с. реакции якоря  $F_{ad}$  кривые 1 и 2 и мощности  $P$  от частоты вращения имеют похожий нелинейный характер в соответствии с кубической зависимости энергии ветра от скорости ветра. Составляющая м.д.с. на

магнитную цепь  $F_{\mu}$  кривые 3 и 4 имеют нелинейный характер, что объясняется электромагнитными свойствами электротехнической стали. Уменьшение м.д.с. реакции якоря происходит интенсивнее, чем рост м.д.с. на магнитную цепь. В итоге результирующие м.д.с. обмотки возбуждения кривые 5 и 6 принимают U-образную форму и пересекаются в точке В. Напряжение поддерживается постоянной линией 7. При отсутствии коммутируемого выпрямителя магнитная цепь насытится и дальнейшее поддержание напряжения будет невозможно.

Регулировочные характеристики двух ступеней имеют U-образную форму и пересекаются в точке В. Результирующая кривая тока возбуждения для двух ступеней будет проходить по кривым через точки АВС.

В момент переключения ступени не изменяется ток возбуждения. Это свойство способствует обеспечению плавности регулирования напряжения во всем рабочем диапазоне, включая моменты переключения ступеней. На регулировочной характеристике наблюдается уменьшение среднего значения тока возбуждения на ступени, работающей при более низких частотах вращения. Уменьшение тока возбуждения разгружает электротехническую сталь.

Изменение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси  $X_d$  и тока короткого замыкания, вызванные переключением ступени коммутируемого выпрямителя, приводит к изменению внешних характеристик генератора. На рисунке 4 приведены внешние характеристики вентильного генератора для первой и второй ступеней коммутируемого выпрямителя.

Характеристики рассчитаны и построены для частоты вращения равной 378 об/мин ( $v=20$  м/с) и мощности 8,9 кВт. Согласно специальной регулировочной характеристике на рис. 4, переключение ступени коммутируемого выпрямителя с первой (кривая 1) на вторую (кривая 2) в этом режиме наиболее благоприятные. Внешние характеристики, как и регулировочные характеристики, пересекаются в точке (3). В точке пересечения напряжение генератора на двух ступенях соответствуют номинальному напряжению, а ток нагрузки соответствует оптимальному для этого режима. Из характеристик видно, что напряжение холостого хода и тока короткого замыкания изменяются пропорционально изменению числа последовательно включенных вентильных блоков.

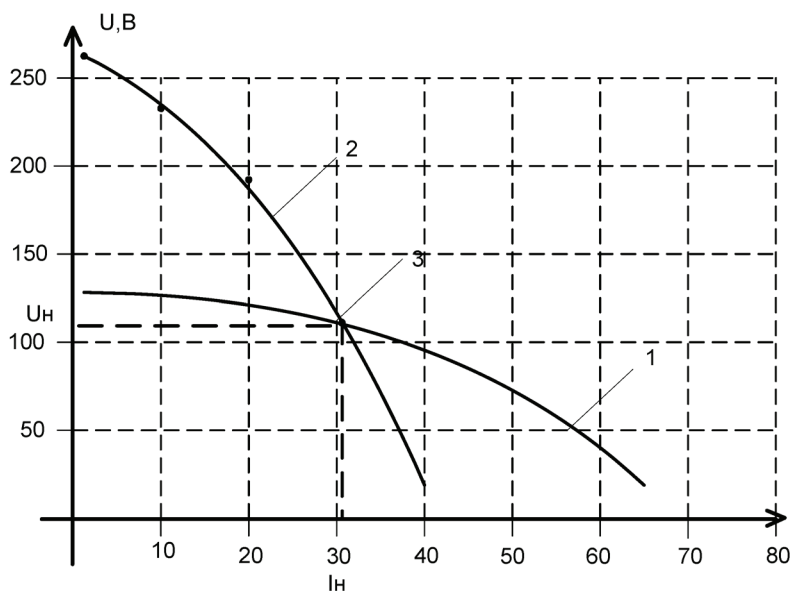


Рис. 4. Внешние характеристики вентильного генератора:  
1, 2 – внешние характеристики на первой и второй ступенях коммутируемого выпрямителя соответственно

Увеличение последовательно включенных вентильных блоков уменьшает ток короткого замыкания и смягчает внешнюю характеристику. Что объясняется увели-

чением сопротивления якорной обмотке, а значит и падения напряжения в ней.

Синхронное индуктивное сопротивление определяется выражением:

$$X_d = X_{ad} + X_s = (2,5 \cdot 10^{-6} m_1 f_1 \frac{D l_\delta}{\delta k_\delta k_\mu} (\frac{\omega k_{\text{об}}}{p})^2) + (1,26 \cdot 10^{-7} m_1 f_1 (\frac{\omega k_{\text{об}}}{pq})^2 \cdot l_\delta \sum \lambda), \quad (9)$$



где  $X_{ad}$ ,  $X_s$  – синхронное индуктивное сопротивление реакции якоря и синхронное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря,  $m_1$  – число фаз обмотки якоря,  $f_1$  – частота напряжения генератора,  $D$  – диаметр сердечника статора,  $l_\delta$  – длина сердечника статора,  $\delta$  – высота воздушного зазора,  $k_\delta$ ,  $k_\mu$ ,  $k_{об}$  – коэффициенты воздушного зазора, насыщения и обмоточный,  $p$  – число пар полюсов,  $\sum \lambda$  – суммарный коэффициент рассеивания обмотки якоря,  $q$  – число пазов на фазу и полюс,  $\omega$  – число витков в параллельной ветви фазы.

Заменим  $f_1$  на  $\frac{pn}{60}$ , выразим выражение через  $n$ ,  $w$  и введем коэффициент ступени  $a$ , который учитывает количество по-

следовательно включенных вентильных блоков. Он определяется по выражению

$$a = \frac{a_{ном}}{a_{пар}}, \quad (10)$$

где  $a_{ном}$ ,  $a_{пар}$  – число параллельных вентильных блоков и число параллельных вентильных блоков включенных последовательно в работающем режиме соответственно.

На высоких частотах вращения коэффициент ступени принимает минимальное значение равное единице, а на самых низких частотах вращения максимальное значение равное числу параллельных ветвей.

Выражение синхронного индуктивного сопротивления примет вид:

$$X_d = ((2,5 \cdot 10^{-6} m_1 f \frac{D l_\delta k_\delta^2}{\delta k_\delta k_\mu}) \frac{pn}{60} \frac{(a \omega)^2}{p^2}) + ((1,26 \cdot 10^{-7} m_1 l_\delta k_\delta \frac{\sum \lambda}{q}) \frac{pn}{60} \frac{(a \omega)^2}{p^2}) = C_k n (a \omega)^2, \quad (11)$$

где  $C_k = ((2,5 \cdot 10^{-6} m_1 \frac{D l_\delta k_\delta^2}{\delta k_\delta k_\mu p}) + (1,26 \cdot 10^{-7} m_1 l_\delta k_\delta \frac{\sum \lambda}{qp}))$  – постоянные для каждой конструкции электрической машины.

Переключение со ступени с меньшим числом последовательно включенных вентильных блоков на ступень с большим числом последовательно включенных вентильных блоков (блоков) производится при снижении частоты вращения до значения, при котором пересекаются характеристики двух ступеней. Из выражения (11) следует, что индуктивное сопротивление уменьшается, но в момент переключения ступени (изменяется коэффициент ступени) синхронное индуктивное сопротивление увеличивается в  $a^2$  раз. Результирующее изменение индуктивного сопротивления определяются выражением:

$$a_c = \frac{n_{раб}}{n_{ном}} (a \omega)^2, \quad (12)$$

где  $n_{раб}$  – рабочая частота вращения в момент переключения.

Активное сопротивление в виду малого значения не учитывается. Более высокое индуктивное сопротивление означает

уменьшение перегрузочной способности, но в тоже время напряжение холостого хода становится выше. Следовательно, генератор способен работать на более низких частотах вращения и нагрузках (кривая 2).

Переключение ступени коммутируемого выпрямителя вне точки пересечения двух ступеней специальной регулировочной или внешней характеристик вызовет изменение тока нагрузки, момента и необходимость проведения регулировочных операций для вывода гидро- и ветростанции на оптимальный режим. Величина изменения тока нагрузки зависит от точности попадания момента переключения в режим соответствующий точке пересечения регулировочных характеристик.

Аналогичные изменения произойдут и в регулировочных характеристиках приведенных на рис. 5 и отражающие зависимости результирующего тока возбуждения от нагрузки  $I_{наг}$  при постоянстве напряжения  $U_{ген}$  и частоты вращения  $n_{ген}$ .

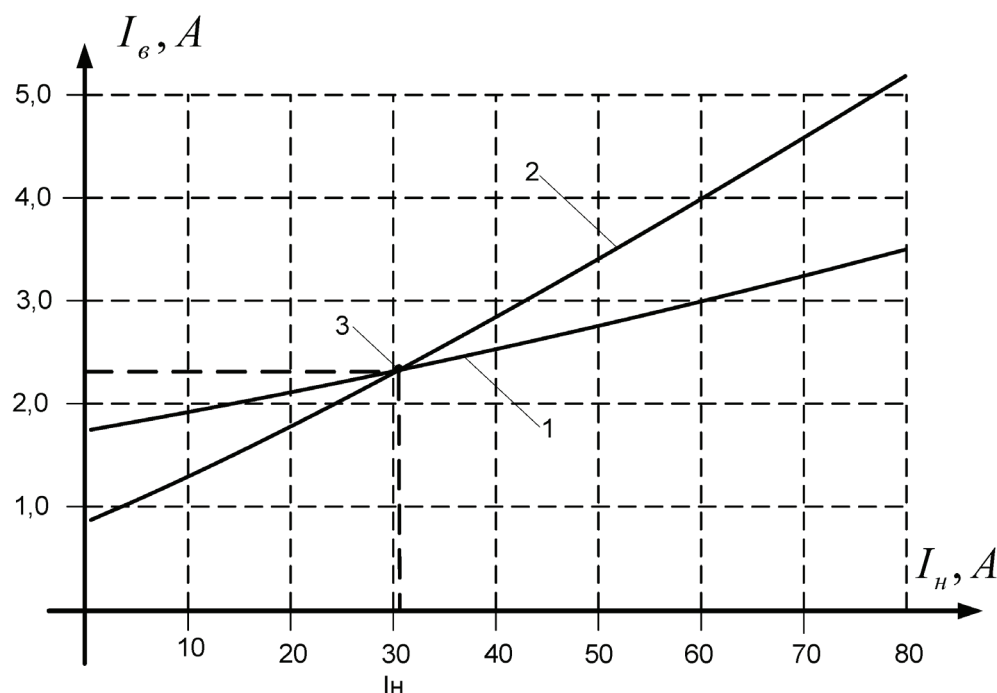


Рис. 5. Регулировочная характеристика вентильного генератора:  
1, 2 – регулировочные характеристики на первой и второй ступенях коммутируемого выпрямителя соответственно; 3 – точка соответствующая оптимальному режиму

На первой ступени с меньшим числом последовательно включенных вентильных блоков при нагрузках меньших оптимальной требуется больший ток возбуждения, чем на второй ступени с большим количеством последовательно включенных вентильных блоков. При нагрузках превышающих оптимальную нагрузку для поддержания номинального напряжения требуется меньший ток возбуждения на первой ступени, что объясняется более жесткой внешней характеристикой на этой ступени.

Анализ всех характеристик показывает, генератор с коммутируемым выпрямителем обладает характеристиками присущими нескольким генераторам с различными обмоточными параметрами и общей конструкцией магнитной части. Работа на каждой ступени соответствует работе генератора, который рассчитан на оптимальный режим в соответствующем

диапазоне изменения частоты вращения и нагрузки.

Перегрузочная способность изменяется согласованно с изменением скорости потока, что очень важно для обеспечения оптимального режима. На низких скоростях, когда мощность маленькая более мягкая характеристика генератора ограничивает степень загрузки микрогидро- и ветродвигателя. На высоких скоростях потока, когда энергии много генератор приобретает более жесткую характеристику, что позволяет загрузить ветродвигатель до оптимального режима. Способность работать на разных частотах вращения расширяет область применения, предлагаемого схемного решения выполнения выпрямителя для вентильного генератора. Это гидроэнергетика, все виды транспорта, где используются автономные источники питания с переменной частотой вращения.



### Выводы

Разработан вентильный генератор под-держивающий постоянство напряжения при переменной частоте вращения и мощности.

Исследование характеристик показали, что полученное схемное решения позволяют произвести настройку характеристик электрогенератора к реальным режимам работы микрогидро – и ветродвигателя.

Переключение последовательно и параллельно включенных параллельных ветвей генератора в коммутируемом выпрямителе улучшает эффективность использования массогабаритных показателей электрогенератора во всех рабочих режимах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукупин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: Научный исследовательский Томский политехнический университет – 2001, 106 с.
2. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветрэлктрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев: Учеб-

ник. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», Севастополь: Севастопольский национальный технический университет, 2003.

3. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветрэлктрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев: Учебник. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», Севастополь: Севастопольский национальный технический университет, 2003 – 400 с.

4. Бакенов К.А. Электромеханический преобразователь с электромагнитным возбуждением. Вестник Павлодарского государственного университета. № 3, 2009. С.17-24.

5. Новокшенов В.С., Болотов С.А., Бакенов К.А. Бесконтактные генераторы для ВЭС малой мощности // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 5-ой межд. науч.-тех. конф. – Некоммерческое АО Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, – 2006. – С. 142-144.

6. Новокшенов В.С., Болотов С.А., Бакенов К.А. Заводские испытания генератора для ветроэлектростанции. Сборник тезисов науч.-техн. конф. «Проблемы развития энергетики и телекоммуникации в свете стратегии индустриально-инновационного развития Казахстана». – Алматы: Некоммерческое АО «Алматинский университет энергетики и связи», 2005. – С. 44.

7. Копылов Л.В. и др. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования / под ред. М.Н. Фесенко – М.: Машиностроение, 1979. – 450 с.