

## К ВОПРОСУ О МАКСИМАЛЬНОМ ТОКЕ НАГРУЗКИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МИКРО-ГЭС

Б.В. Сёмкин, П.П. Свит

Увеличение дефицита топлива, рост цен на энергию, возрастающее загрязнение окружающей среды, необходимость энергоснабжения отдаленных специфических потребителей привели к более широкому использованию экологически чистых нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) и созданию разнообразных автономных энергоустановок, использующих их энергию. На основе НВИЭ работает немало сооружений альтернативной энергетики: солнечные батареи и водонагреватели, биогазовые установки, микро-ГЭС, ветроэлектростанции и т. п. [1]. Для электроснабжения автономных потребителей часто используют микро-ГЭС. В таких источниках электропитания широкое применение нашли асинхронные генераторы (АГ) с короткозамкнутым ротором. Простейшим в конструктивном отношении является АГ, представляющий собой надежный и недорогой серийный трехфазный асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором общепромышленного использования, к статорным обмоткам которого параллельно подключаются конденсаторы возбуждения [2].

В условиях энергетического кризиса человечество практически не использует огромный потенциал экологически чистого возобновляемого источника энергии – водяных потоков с напорами от 1 до 6 м и мощностью от 1 до 100 кВт. В современных микро-ГЭС, работающих на небольших напорах и расходах воды, чаще применяются поворотно-осевые и пропеллерные турбины. Но из-за сложной конструкции и высокой стоимости гидротурбин их применение в низконапорных микро-ГЭС нерентабельно. В качестве низконапорных энергоустановок мощностью до 100 кВт наиболее выгодными являются микро-ГЭС с водоналивными колесами. О перспективности их использования свидетельствует опыт Южной Германии, где в настоящее время работают 33 микро-ГЭС на основе водоналивных колес со средней мощностью 17,1 кВт [3].

Выпуск отечественной промышленностью АД в большом разнообразии по типу исполнения, мощности, скорости вращения по хорошо отработанным технологиям позволяет создавать АГ на их основе, совмещающиеся с водоналивными колесами различных типоразмеров и мощностей.

Неизбежные колебания напора воды приводят к изменениям мощности и скорости вращения водоналивного колеса. Поэтому в таких источниках электропитания применяют системы автоматического управления (САУ) выходными параметрами АГ, что приводит к повышению их стоимости и снижению эксплуатационных параметров.

Режим стока большинства малых рек характеризуется относительной стабильностью и расход воды в течение определенного промежутка времени остается примерно постоянным. Некоторым потребителям электроэнергии важна величина электрического тока, а не напряжение и его частота (например, специальная сельскохозяйственная нагрузка, нагревающие элементы и т.д.). Для таких потребителей применять САУ, контролирующую и поддерживающую амплитуду и частоту выходного напряжения, не обязательно. Но тогда возникает вопрос, какой максимальный ток нагрузки можно получить при известных начальных параметрах АГ. Под начальными параметрами понимается емкость конденсаторных батарей, скорость вращения ротора АГ на холостом ходу, напряжение и ток фазы холостого хода (ХХ).

Нами проведены исследования по определению зависимости максимального тока нагрузки от скорости вращения, напряжения и тока трехфазного АГ при номинальной величине емкости конденсаторов возбуждения. Статорные обмотки АГ были соединены звездой, а подключаемые к ним конденсаторы возбуждения – треугольником. При таком соединении АГ величина номинальной емкости конденсаторов возбуждения минимальная и может быть определена по формуле [4]:

$$C_{\text{н}} = \frac{I_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}{\sqrt{3} \omega U_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{н}}$ ,  $I_{\text{н}}$  – номинальные напряжение и ток АД при соединении ее статорных обмоток звездой;

$\cos \varphi_{\text{н}}$  – номинальный коэффициент мощности АД;

$\omega$  – угловая частота сети.

В качестве генератора использовался серийный трехфазный АД с короткозамкнутым ротором марки АИР, на базе которой планиро-

валось разработать ряд конструкций микро-ГЭС.

Мощность водоналивного колеса является линейной функцией расхода воды, поэтому в качестве приводного двигателя использовался двигатель постоянного тока независимого возбуждения, мощность которого была соизмерима с мощностью АГ. Нагрузка подключалась к АГ по схеме Ларионова.

Круговая диаграмма АД, работающего в генераторном режиме, позволяет определить все электромагнитные параметры машины (токи, моменты, мощности, потери и  $\cos\varphi$ ) и дает наглядное представление об их изменении при изменении режима работы АГ. Однако, ряд допущений, применяемых при построении круговой диаграммы, снижает точность полученных результатов (переход от Т-образной схемы замещения к Г-образной, постоянство параметров машины при изменении скольжения и др.) [5]. Возможность построения точной круговой диаграммы усложняется использованием трудно определяемых параметров машины. Нами предлагается графическое определение электромагнитных параметров АГ на основе экспериментальных данных, без сложных аналитических вычислений и графических построений.

Целью данной работы было установление характера зависимостей максимального тока нагрузки от выходных параметров АГ на холостом ходу и изменения напряжения, тока и скорости вращения ротора АД при включении нагрузки, представляющие интерес для построения САУ.

Значения выходных параметров АГ (скорость вращения ротора, линейное напряжение и фазный ток) выражены в относительных единицах от соответствующих номинальных величин АД. Сопrotивление нагрузки ( $r_{нз}$ ) выражено в относительных единицах от величины, получающейся при установлении на зажимах АГ номинального напряжения  $U_n$  и протекающего по его обмоткам номинального тока  $I_n$ .

Обработка экспериментальных данных проводилась по методу регрессионного анализа. Оценки коэффициентов регрессионных моделей вида:

$$y_1 = a_1 + b_1x \quad (2)$$

$$y_2 = a_2 + b_2x + c_2x^2 \quad (3)$$

$$y_3 = a_3 + b_3x + c_3x^2 + d_3x^3 \quad (4)$$

были определены по методу наименьших квадратов. Значимость коэффициентов моделей оценивалась по критерию Стьюдента в

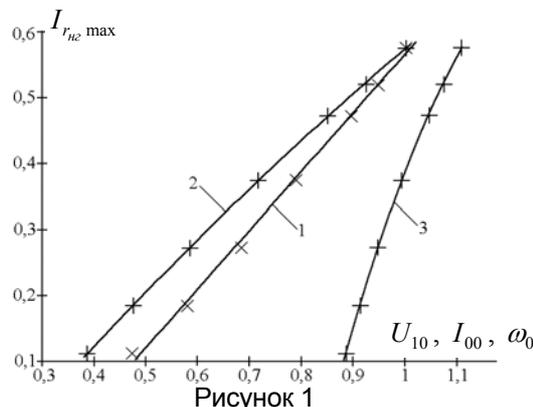
предположении, что остатки ( $y_{выч} - y_{экс}$ ) распределены по нормальному закону при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Адекватность моделей экспериментальным данным оценивалась по критерию Фишера. Модель считалась адекватной, если вычисленное значение F-критерия превышало табличное не менее, чем в четыре раза.

На рисунке 1 представлены зависимости максимального тока нагрузки АГ ( $I_{r_{нз} \max}$ ) от установившегося напряжения XX ( $U_{10}$ ) (кривая 1), тока фазы XX ( $I_{00}$ ) (кривая 2) и скорости вращения ротора АГ на холостом ходу ( $\omega_0$ ) (кривая 3).

Как и следовало ожидать, зависимость 1 носит линейный характер и может быть описана уравнением (2), в котором коэффициенты  $a_1$  и  $b_1$  соответственно равны: -0,326 и 0,892. Обработка экспериментальных данных зависимостей 2 и 3 показала, что наиболее приемлемой является модель вида (3) с коэффициентами  $a_2$ ,  $b_2$  и  $c_2$  соответственно: -0,235, 0,951 и -0,142 (зависимость 2), -4,77, 8,267 и -3,11 (зависимость 3).

Результаты показали, что с понижением напряжения XX пропорционально уменьшается ток нагрузки АГ, а ток фазы XX и скорость вращения на холостом ходу изменяются нелинейно. Полученные зависимости позволяют определить максимальный ток нагрузки по величине линейного напряжения XX, тока фазы XX или скорости вращения АГ на холостом ходу и наоборот, необходимые начальные выходные параметры АГ, если задан требуемый ток нагрузки. Таким образом, установленные зависимости позволяют по одному из начальных параметров АГ определять остальные, не прибегая к сложным вычислениям.

Известно, что при включении активной нагрузки на валу АГ появляется добавочный тормозной момент, в результате которого скорость вращения ротора АГ и напряжение



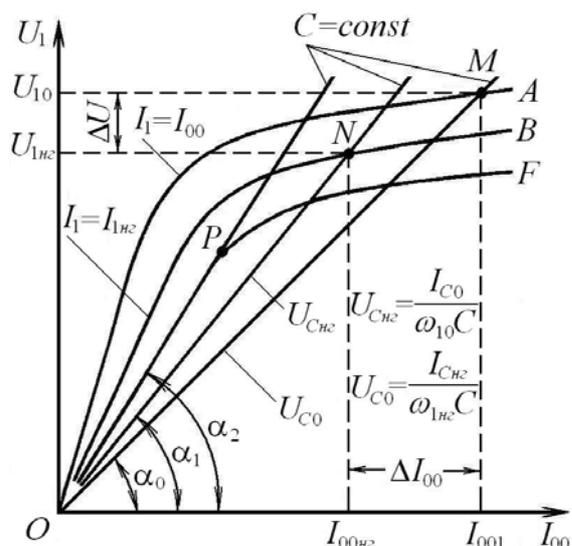


Рисунок 2 – Характеристика холостого хода (OMA), нагрузочные характеристики генератора (ONB, OPF) и вольтамперные характеристики конденсатора при постоянной скорости вращения ротора АГ и переменной частоте напряжения

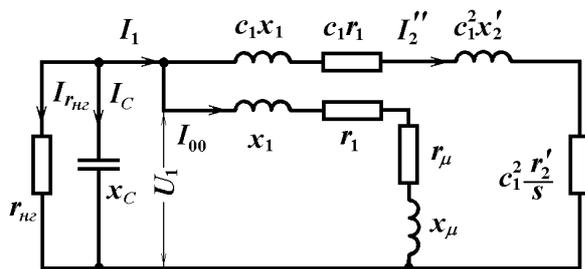


Рисунок 3 – Г-образная схема замещения АГ

на его зажимах будут уменьшаться. На рисунке 2 показаны характеристика холостого хода (OMA), нагрузочные характеристики генератора (ONB, OPF) и вольтамперные характеристики конденсатора при постоянной скорости вращения ротора АГ и переменной частоте напряжения. Вольтамперные характеристики конденсатора соответствуют одной и той же емкости  $C = const$ . Характеристика холостого хода (без учета остаточной ЭДС) изображена кривой, проходящей через начало координат. Она пересекается с вольтамперной характеристикой конденсатора (прямая OM) в точке M, соответствующей установившемуся режиму АГ, который характеризуется напряжением  $U_{10}$  и током  $I_{001}$  холостого хода. Г-образная схема замещения АГ представлена на рисунке 3. Этой схеме замещения соответствует система уравнений (5).

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -jx_c I_C \\ U_1 &= I_{00}(r_1 + r_\mu + j(x_1 + x_\mu)) \\ U_1 &= I_2''(c_1(r_1 + c_1 r_2'/s) + jc_1(x_1 + c_1 x_2')) \\ I_1 &= I_{r_{nz}} + jI_C = I_{00} + I_2'' \end{aligned} \right\} (5)$$

После включения генератора на нагрузку координаты рабочей точки (см. рисунок 2), т.е. точки пересечения магнитной (нагрузочной) характеристики машины и вольтамперной характеристики конденсатора, изменяются вследствие изменения тока намагничивания  $I_{00}$  и напряжения ( $U_1$ ). С переходом от холостого хода к номинальной нагрузке рабочая точка перемещается из положения M на характеристике холостого хода в положение N на нагрузочной характеристике ONB. Вольтамперная характеристика конденсатора поворачивается против часовой стрелки на угол  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$ , соответствующий приращению реактивного сопротивления конденсатора, обусловленному уменьшением частоты.

Изменение напряжения и тока намагничивания при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке составляют:

$$\Delta U = U_{10} - U_{1nz}; \Delta I_{00} = I_{001} - I_{00nz}.$$

По мере увеличения нагрузки вольтамперная характеристика конденсатора продолжает поворачиваться против часовой стрелки, а рабочая точка перемещается в направлении к точке P. При этом генератор все более размагничивается, что сопровождается уменьшением напряжения на его зажимах. С переходом рабочей точки в ненасыщенную область OP напряжение резко исчезает. Режим самовозбуждения сохраняется до некоторой определенной нагрузки, характеризующей предел статической устойчивости машины.

Экспериментальное получение характеристик автономного АГ переменной частоты осуществляется довольно просто, но теоретическое исследование режимов его работы встречает значительные затруднения. Каждой произвольно взятой нагрузке соответствует определенная частота и скольжение, а все реактивные параметры системы АГ – нагрузка становятся функциями скольжения, причем практически отпадает возможность использования такого метода анализа, как метод круговых диаграмм.

Для выявления характера зависимостей скорости вращения ( $\omega_{nz}$ ) (кривая 1) и напряжения ( $U_{1nz}$ ) (кривая 2) от величины максимального тока нагрузки ( $I_{r_{nz} \max}$ ), представленные на рисунке 4, был проведен ряд экспериментов.

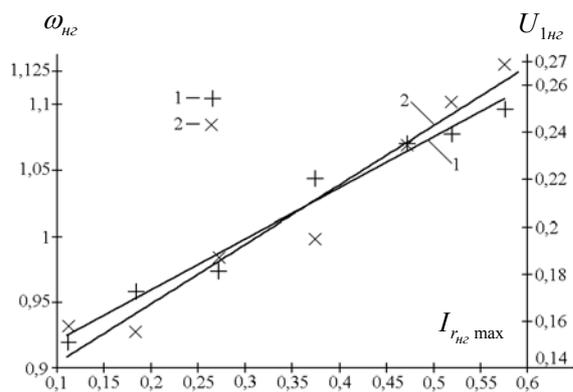


Рисунок 4

Из Г-образной схемы замещения АГ (рисунок 3) и системы уравнений (5) видно, что напряжение генератора определяется величиной реактивной проводимости намагничивающего контура. При условии  $C = const$  проводимость зависит от величины нагрузки  $r_{нз}$  и частоты напряжения. С увеличением нагрузки возрастает реактивная проводимость главного контура, а проводимость намагничивающего контура уменьшается. Происходящее при этом снижение намагничивающего тока вызывает ослабление основного магнитного потока и напряжения на зажимах машины. Включение активной нагрузки вызывает уменьшение скорости вращения ротора АГ и, как следствие, понижение частоты напряжения. Это вызывает уменьшение тока шунтирующих конденсаторов и также является причиной снижения напряжения.

Результаты показывают, что с уменьшением максимального тока нагрузки скорость вращения и напряжение под нагрузкой линейно снижаются. Математически зависимости  $\omega_{нз} = f(I_{рнз\ max})$  и  $U_{нз} = f(I_{рнз\ max})$  можно описать уравнением вида (2), в котором коэффициенты  $a_1$  и  $b_1$  соответственно равны: 0,881 и 0,385 (зависимость 1) и 0,117 и 0,251 (зависимость 2).

Таким образом, используя полученные зависимости, по величине максимального тока можно определить, какими будут напряжение и скорость вращения АГ под нагрузкой, а следовательно, и частота вырабатываемого напряжения.

Нами получены также кривые, позволяющие по начальным значениям напряжения и тока ХХ, определять величину сопротивления нагрузки, при котором ток нагрузки для данного напряжения будет максимальным, долю максимального тока нагрузки от величины тока фазы на холостом ходу и кратность уменьшения линейного напряжения при данной нагрузке. На рисунке 5 представлены за-

висимости от напряжения ХХ ( $U_{10}$ ) сопротивления нагрузки  $r_{нз}$ , при включении которого ток, протекающий в нем, будет максимальным, (кривая 1), коэффициента тока  $K_{I_1}$  (кривая 2) и коэффициента напряжения  $K_U$  (кривая 3). Коэффициент тока  $K_{I_1}$  представляет собой отношение максимального тока нагрузки к току фазы на холостом ходу. Коэффициент напряжения  $K_U$  – это отношение напряжения, при котором ток нагрузки будет максимальным, к напряжению ХХ.

Анализ рисунка 5, показывает, что при уменьшении напряжения ХХ сопротивление увеличивается. При этом величина максимального тока нагрузки уменьшается (зависимость 1, рисунок 1). При изменении напряжения ХХ от  $U_n$  до  $0,75 U_n$  сопротивление нагрузки изменяется в пределах  $0,38 \div 0,48$  от номинального ( $r_n$ ), а при изменении напряжения ХХ от  $0,75 U_n$  до  $0,5 U_n$  сопротивление увеличивается примерно на  $0,6 r_n$ . То есть при изменении напряжения холостого хода от  $0,5 U_n$  до  $0,75 U_n$  сопротивление нагрузки уменьшается в большей степени, чем при увеличении напряжения от  $0,75 U_n$  до  $U_n$ . Зависимость можно описать уравнением типа (4), в котором  $a_3 = 7,94$ ,  $b_3 = -25,686$ ,  $c_3 = 29,44$  и  $d_3 = -11,318$ .

Определив величину сопротивления нагрузки для данного напряжения ХХ по кривой 1 (рисунок 5), и, зная ток фазы ХХ для этого напряжения, по кривой 2 можно определить  $K_{I_1}$ . Максимальный ток нагрузки, вызванный подключением сопротивления, равен произведению коэффициента  $K_{I_1}$  на величину тока фазы ХХ. Следует заметить, что с плавным уменьшением напряжения ХХ коэффициент

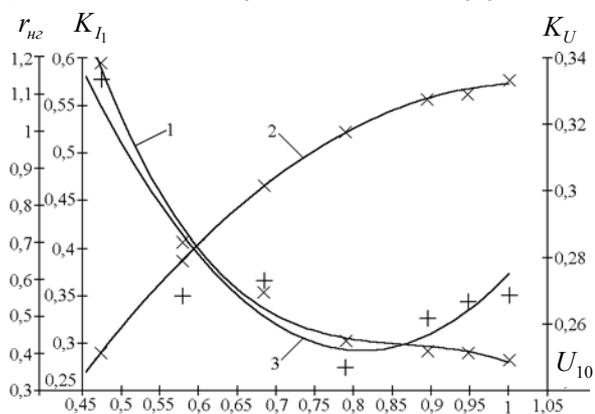


Рисунок 5

$K_{I_1}$  уменьшается нелинейно. Так, при уменьшении напряжения ХХ от  $U_n$  до  $0,75U_n$  величина  $K_{I_1}$  уменьшается от 0,57 до 0,5, а при уменьшении напряжения от  $0,75U_n$  до  $0,5U_n$   $K_{I_1}$  уменьшается от 0,5 до 0,32. Кривую 2 (рисунок 5) можно описать уравнением типа (3), в котором коэффициенты  $a_2$ ,  $b_2$  и  $c_2$  соответственно равны: -0,406, 1,908 и -0,93.

По кривой 3 (рисунок 5) можно определить коэффициент  $K_U$ , показывающий, какой процент от напряжения ХХ составит напряжение на зажимах АГ при нагрузке. Зависимость описывается уравнением вида (3) с коэффициентами  $a_2 = 0,677$ ,  $b_2 = -1,051$  и  $c_2 = 0,648$ .

Представляет интерес зависимость отношения максимального тока нагрузки к току фазы, обозначенное  $K_{I_2}$ , от напряжения ХХ. Такая зависимость представлена на рисунке 6, из которого видно, что при плавном изменении напряжения ХХ величина  $K_{I_2}$  изменяется по кубической зависимости (4). Так, изменение напряжения ХХ от  $U_n$  до  $0,65U_n$ , вызывает незначительное изменение  $K_{I_2}$  – от 1 до 0,96, а при уменьшении напряжения ХХ от  $0,65U_n$  до  $0,475U_n$  коэффициент  $K_{I_2}$  снижается до 0,74. Следовательно, если напряжение ХХ меняется в пределах от  $U_n$  до  $0,65U_n$ , можно считать, что ток нагрузки достиг максимального значения, если он примерно равен току фазы при включенной нагрузке.

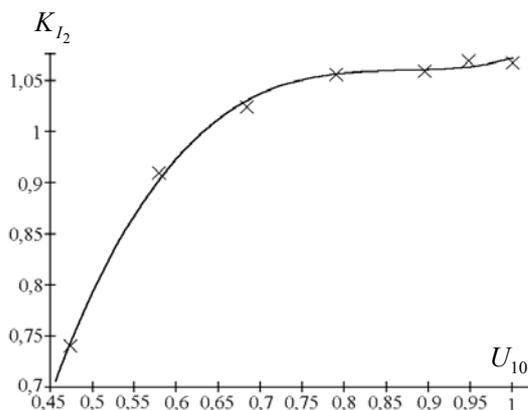


Рисунок 6

Таким образом, изменение напряжения ХХ от  $U_n$  до  $0,65U_n$  вызывает примерно пропорциональное изменение тока нагрузки и тока фазы, а при изменении напряжения от  $0,65U_n$  до  $0,475U_n$  – ток нагрузки изменяется в большей степени, чем ток фазы. Поэтому уменьшение напряжения ХХ ниже  $0,65U_n$  не рационально, так как при дальнейшем понижении напряжения ток нагрузки составляет менее 0,45 от тока фазы ХХ (кривая 2 на рисунке 5), который и так уменьшается из-за уменьшения напряжения и скорости вращения (кривые 1-3 на рисунке 1).

На основании проделанной работы можно подвести некоторые итоги:

1) зависимости максимального тока нагрузки от напряжения ХХ, скорости вращения и напряжения под нагрузкой от максимального тока носят линейный характер;

2) на основании экспериментальных данных, полученных для типового АД серии АИР при постоянной номинальной емкости конденсаторов возбуждения, без сложных аналитических вычислений и графических построений, можно определить:

- максимальный ток нагрузки по одному из выходных параметров АГ на холостом ходу;
- скорость вращения АГ, напряжение и ток фазы при максимальном токе нагрузки;
- величину сопротивления активной нагрузки при различных выходных параметрах АГ на холостом ходу;

3) если напряжение ХХ лежит в пределах от  $U_n$  до  $0,65$ , то максимальный ток нагрузки равен току фазы под нагрузкой, но меньше тока фазы на холостом ходу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муругов В.П., Пинов Н.Б. Расширение сферы использования энергии возобновляемых источников // Техника в сельском хозяйстве. – 1996. – № 2. – С. 17-19.
2. Вишневский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. – Одесса: Изд-во "Лыбидь" при Киев. ун-те, 1990. – 168 с.
3. Gerald Muller, Klemens Kauppert. Old watermills – Britain's new source of energy? // New civil engineer international. – March. – 2003. – р. 20-28.
4. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.