УДК 621.313.332.012

МЕТОД РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ЕМКОСТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Канд. техн. наук, доц. СЕРГИЕНКО С. А., ЗАЧЕПА Ю. В.

Кременчугский национальный университет имени М. Остроградского

Современной тенденцией развития энергетики является стремление к сбалансированности энергорайонов, повышение надежности электроснабжения потребителей. Важное место в стратегии развития электроэнергетики занимают автономные системы электроснабжения (АСЭ). В последнее время АСЭ получают широкое распространение в системе электроснабжения не только специального, но и общего применения. АСЭ используются почти во всех областях народного хозяйства. Их основными потребителями являются топливно-энергетический, агропромышленный и машиностроительный комплексы.

Необходимость в АСЭ возникает там, где технически невозможно или экономически невыгодно использовать централизованное электроснабжение. Это, в первую очередь, труднодоступные объекты, отдаленные от больших электрических систем, которые имеют собственные источники первичной энергии, например газовые и нефтяные месторождения [1].

В указанных источниках электропитания преимущественно применяются синхронные генераторы (СГ). Однако в последнее время наметилась тенденция использования в качестве преобразователей энергии асинхронных генераторов (АГ) или асинхронных двигателей (АД), работающих в генераторном режиме. Эти генераторы с короткозамкнутым ротором в конструктивном отношении более просты и надежны в сравнении с СГ. В диапазоне мощностей 5–100 кВт масса АГ без устройств возбуждения приблизительно в 1,3–1,4 раза меньше, чем масса СГ такой же мощности. Бесконтактное исполнение, простота включения на параллельную работу, высокое качество динамических процессов и безопасность режима короткого замыкания – все эти преимущества делают проблему использования АГ в АСЭ перспективной.

До настоящего времени АГ применялись для питания активной нагрузки (освещение, нагревательные элементы, аппараты электросварки, а также электронные приборы). Анализ [2, 3] в этом направлении показал, что достаточно подробно рассмотрено использование асинхронных машин (АМ) в режиме самовозбуждения для обеспечения динамического торможения, а также для питания постоянной по характеру активной и активно-индуктивной нагрузок. В то же время использованию АГ для питания электрических машин, которые характеризуются наличием пусковых токов и переменным коэффициентом мощности, уделено недостаточно внимания.

Поэтому целью исследований авторов являются разработка уточненного метода расчета рабочих характеристик АГ при работе на двигательную нагрузку, а также анализ влияния параметров нагрузки и емкостной системы возбуждения (ЕСВ) на перегрузочную способность АГ.

Работу АГ при изменяющихся величинах выходного напряжения и частоты, а также величине и характере нагрузки принято анализировать на основании статических характеристик.

Существуют два способа определения статических характеристик АГ:

- путем построения полной математической модели АГ в виде системы алгебраических и дифференциальных уравнений и расчета отдельных точек статических характеристик на основании расчета установившихся и переходных режимов работы генератора для разных условий действия нагрузки;
- путем расчетов с использованием известных схем замещения АМ.

Первый метод обеспечивает более точные результаты, однако он громоздкий и трудоемкий. Составлять такую модель лишь для определения статических характеристик нецелесообразно, так как автономные АГ практически не могут работать без схем стабилизации выходного напряжения или напряжения и частоты. Кроме того, уже в начальной стадии расчетов часто требуется информация, касающаяся подбора основных элементов (реактивной мощности и емкости возбуждающих конденсаторов, количества конденсаторных ступеней в схеме стабилизации напряжения, емкости конденсаторов отдельных ступеней и т. п.), а также в случае применения типовых АМ – оценка их пригодности. Такую информацию легко получить, используя второй способ определения статических характеристик на основе известных схем замещения АМ.

На первом этапе исследований АГ наиболее распространенными методами расчета статических характеристик были графические методы, основанные на круговой диаграмме АМ [4, 5]. Круговая диаграмма дополняется зависимостями $U_{\text{г}} = f(B_0)$ и $G_0 = f(B_0, B_c)$, которые получаются либо расчетным путем, либо из опыта холостого хода (G_0 и B_0 – активная и реактивная составляющие проводимости намагничивающего контура фазы АГ).

К графическим методам относятся и более сложные способы расчета, основанные на графическом решении нелинейных уравнений проводимости Г-образной схемы замещения генератора. Однако, несмотря на простоту и наглядность графических методов, они не обеспечивают необходимой точности расчетов и отличаются значительной трудоемкостью.

По мере развития вычислительной техники данные методы заменялись графоаналитическими [6, 7]. В этой группе можно выделить две подгруппы методов, основанных на балансе активных и реактивных проводимостей Г- либо Т-образной схемы замещения. Для расчета характеристик согласно Г-образной схеме необходимо знать все параметры генератора и иметь зависимость ЭДС от индуктивного сопротивления намагничивающего контура $E_1 = f(X_m)$, снятую при скольжении $s = 0$ и номинальной частоте. Расчет ведется по заданным значениям емкости, скорости вращения ротора и величины активного сопротивления нагрузки. Погрешность расчета характеристик составляет около 10 %.

Характерной особенностью расчетов по Т-образной схеме является необходимость совместного решения уравнений $X_m = f(E_0)$ или $U_{\text{г}} = f(I_m)$ и $U_c = f(I_c)$, которое дает величину напряжения холостого хода генератора U_n. Погрешность при расчете составляет 5–10 %. Такой подход к решению задачи создает дополнительные трудности при попытке автоматизировать расчет статических характеристик на ЭВМ.

Еще одной группой методов расчета статических характеристик, получившей в настоящее время наибольшее распространение, являются аналитические методы [8, 9]. В данном случае расчет сводится все к тому же балансу активных и реактивных проводимостей Г- или Т-образной схемы замещения, а нелинейная характеристика намагничивания машины аппроксимируется одним из известных способов: кусочно-линейными и степенными функциями, тригонометрическими рядами, с использованием трансцендентных функций, на основе преобразования гиперболы и др. Эти методы обеспечивают более высокую точность расчетов и дают возможность автоматизировать вычисления с помощью ЭВМ.

Однако все известные методы расчета статических характеристик АГ с конденсаторным возбуждением имеют два основных недостатка, вытекающих из принимаемых допущений, последствия которых проявляются в основном при расчете характеристик генераторов малой мощности. В большинстве перечисленных методов расчета принято допущение, что скорость привода генератора меняется так, чтобы частота генерированного напряжения оставалась постоянной и равной синхронной частоте, независимо от характера и величины нагрузки. Это допущение приводит к тому, что характеристики рассчитываются для условий, отличающихся от действительных. Применяемые приводы имеют чаще всего стабилизированную скорость вращения. Управление этой скоростью в зависимости от величины и характера нагрузки для достижения постоянной частоты напряжения трудоемко и неэкономично.

В некоторых работах, особенно для машин большой мощности, влиянием нагрузки на частоту генерированного напряжения просто пренебрегают, а такое упрощение, согласно исследованиям [10], допустимо для машин с номинальным скольжением порядка 0,03.

В случае применения в качестве генератора АМ с числом пар полюсов $p > 1$ и номинальным скольжением $s_{\text{н}}$ порядка 0,05–0,06 неучет влияния нагрузки на частоту напряжения приводит к значительным ошибкам в расчете статических характеристик. Это иллюстрирует рис. 1, на котором показано влияние изменения частоты на положение рабочей точки на характеристике холостого хода АГ, построенного на базе типового электродвигателя мощностью $P_{\text{н}} = 1,2$ кВт с номинальным скольжением $s_{\text{н}} = 0,05$ (точка A соответствует синхронной частоте $f_{\text{н}} = 50$ Гц, точка A_1 – для реальной частоты при номинальной нагрузке $f = (1 - s_{\text{н}}) f_{\text{н}}$).

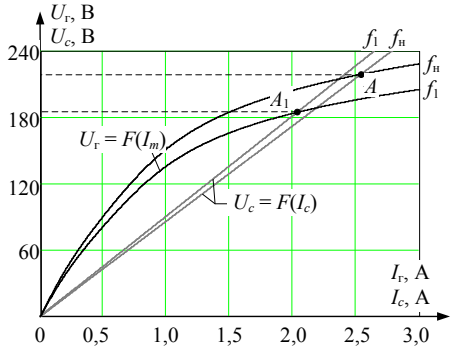

Рис. 1. Изменение положения рабочей точки АГ с емкостной системой возбуждения в зависимости от частоты генерируемого напряжения

Так как рассматриваемые вопросы в настоящей статье посвящены созданию автономного источника питания на базе АГ малой мощности (до 100 кВт), возникла необходимость разработки уточненного метода расчета статических характеристик системы АГ–АД, учитывающей изменения частоты, обусловленной нагрузкой.

Для расчета рабочих характеристик системы АГ–ЕСВ–АД воспользуемся одной из общепринятых схем замещения соответствующих электрических машин (рис. 2), которая описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} -(R_{1н} + \alpha j X_{1н}) I_{1н} - \alpha j X_{μн} I_{μн} - \alpha j X_c I_c = 0; \\ \left(\dfrac{R_{2н}}{s_д} + \alpha j X'_{2н} \right) I_{2н} + \alpha j X_{μн} I_{μн} = 0; \\ -(R_1 + \alpha j X_1) I_1 - \alpha j X_μ I_μ + \alpha j X_c I_c = 0; \\ \left(\dfrac{R_2}{s_г} + \alpha j X'_2 \right) I_2 + \alpha j X_μ I_μ = 0; \\ I_1 - I_{1н} - I_c = 0; \\ -I_1 - I_2 + I_μ = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $R_{1н}$, $R'_{2н}$, $R_{μн}$ – активные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АД; $X_{1н}$, $X'_{2н}$, $X_{μн}$ – реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АД; $I_{1н}$, $I_{2н}$, $I_{μн}$ – токи статорной, роторной цепей и контура намагничивания АД; I_c – ток ЕСВ; X_c – реактивное сопротивление ЕСВ; R_1, R'_2, $R_μ$ – активные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ; X_1, X'_2, $X_μ$ – реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ; I_1, I'_2, , $I_μ$ – токи статорной, роторной цепей и контура намагничивания АГ; $s_г$, $s_д$ – скольжения АГ и АД; $\alpha = f/f_н$ – относительная частота генерированного напряжения $U_г$.

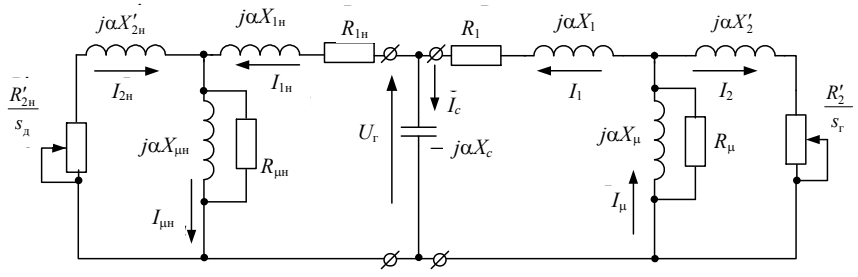

Рис. 2. Схема замещения системы АГ–ЕСВ–АД

При определении характеристик системы (1) в статических режимах работы неизвестными являются все реактивные сопротивления генератора и двигателя, а также частота генерируемого напряжения в цепи. Все остальные параметры принимаются постоянными, при этом скольжение АГ представляется зависимостью от частоты

$$s_{\text{г}} = \frac{1-\alpha}{\alpha}.$$

Поставленную задачу можно условно разбить на три этапа. Сначала по известным паспортным данным подключаемого к зажимам АГ асинхронного двигателя находим номинальные значения скольжения $s_{\text{д}}$ и сопротивления контура намагничивания $X_{\mu\text{н}}$, которые рассчитываются для соответствующих значений скорости вращения генератора ω_0 и частоты $f_{\text{н}} = 50$ Гц.

Далее для определения недостающих параметров воспользуемся известным методом представления АД в статических режимах эквивалентной RL-цепью (рис. 3) с параметрами [11]:

$$R_{\text{н}} = R_{1\text{н}} + \frac{X_{\mu\text{н}}^2}{s_{\text{д}}(X_{\mu\text{н}} + X'_{2\text{н}})^2 + R'^2_{2\text{н}}};\ X_{\text{н}} = X_{1\text{н}} + \frac{X_{\mu\text{н}} R'_{2\text{н}}}{R'_{2\text{н}}} - \frac{R_{\text{н}} s_{\text{д}} (X_{\mu\text{н}} + X'_{2\text{н}})}{R'_{2\text{н}}}, \quad (2)$$

которые могут быть рассчитаны для любого значения скольжения двигателя $s_{\text{д}}$.

Таким образом, схему замещения можно представить в виде рис. 4.

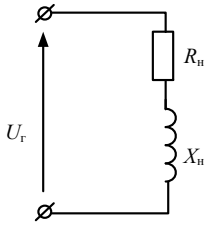

Рис. 3. Эквивалентная схема замещения системы АД

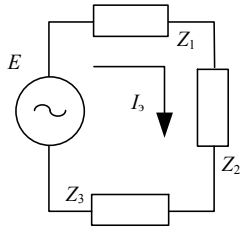

Рис. 4. Эквивалентная схема замещения системы АГ–ЕСВ–АД

С учетом выполненных преобразований на основе второго закона Кирхгофа получим

$$I_{\text{э}} Z_{\Sigma} = E, \quad (3)$$

где $Z_{\Sigma} = Z_1 + Z_2 + Z_3$ – полное сопротивление цепи, определяется как: $Z_1 = R_1 + j\alpha X_1$ – полное сопротивление статорной цепи АГ; $Z_2 = R_1 + j\alpha X_1 + {}$ $+ Z_3 - j\alpha X_c$ – полное сопротивление цепей нагрузки АД и емкостного возбуждения; $Z_3 = \dfrac{-\alpha^2 X'_2 X_{\mu} + \alpha^3 X'_2 X_{\mu} + j\alpha X'_2 R_{\mu} - j\alpha^2 X'_2 R_{\mu} + j\alpha^2 R'_2 X_{\mu} + \alpha R'_2 R_{\mu}}{j\alpha X'_2 - j\alpha^2 X'_2 + \alpha R'_2 + j\alpha X_{\mu} - j\alpha^2 X_{\mu} + R_{\mu} - \alpha R_{\mu}}$ – полное сопротивление цепей ротора и намагничивания АГ; $E = \varphi\omega_0 = {}$ $= L_{\mu} I_{\mu} \omega_0$ – ЭДС генератора; $I_{\text{э}}$ – приведенный ток цепи.

Ввиду того что входящие в уравнение (3) составляющие полного сопротивления Z_{Σ} цепи являются комплексными величинами, представим эти выражения в удобном для последующих преобразований виде. Тогда, используя свойства комплексных чисел, на основе ряда математических преобразований получим:

• полное сопротивление статорной цепи АГ

$$Z_1 = A_1 + jB_1,$$

где $A_1 = R_1$ – действительная часть сопротивления; $B_1 = \alpha X_1$ – мнимая часть сопротивления;

• полное сопротивление цепей нагрузки и емкостного возбуждения

$$Z_2 = A_0 + jB_0,$$

где $A_0 = \dfrac{\alpha^2 X_c^2 R_н}{R_н^2 + \alpha^2 X_c^2 + 2\alpha^2 X_c X_н + \alpha^2 X_н^2}$ – действительная часть сопротивления; $B_0 = \dfrac{\alpha X_c R_н^2 + \alpha^3 X_c^2 X_н + \alpha^3 X_c X_н^2}{R_н^2 + \alpha^2 X_c^2 + 2\alpha^2 X_c X_н + \alpha^2 X_н^2}$ – мнимая часть сопротивления;

• полное сопротивление цепей ротора и намагничивания АГ

$$Z_3 = A_2 + jB_2,$$

где

$$A_2 = \frac{\alpha^6 X_2'^2 R_μ X_μ^2 - 2\alpha^5 X_2'^2 R_μ X_μ^2 + \alpha^4 X_2'^2 R_μ X_μ^2 + \alpha^4 R_2'^2 R_μ X_μ^2}{\alpha^6 X_μ^2 X_2'^2 - 2\alpha^5 X_μ^2 X_2'^2 + \alpha^4 X_μ^2 X_2'^2 + \alpha^4 X_2'^2 R_μ^2 - 2\alpha^3 X_2'^2 R_μ^2 + \alpha^2 R_μ^2 X_2'^2} -$$

действительная часть сопротивления;

$$B_2 = \frac{\alpha^5 X_2'^2 R_μ^2 X_μ - 2\alpha^4 X_2'^2 R_μ X_μ + \alpha^3 X_2'^2 R_μ^2 X_μ + \alpha^3 R_2'^2 R_μ^2 X_μ}{\alpha^6 X_μ^2 X_2'^2 - 2\alpha^5 X_μ^2 X_2'^2 + \alpha^4 X_μ^2 X_2'^2 + \alpha^4 X_2'^2 R_μ^2 - 2\alpha^3 X_2'^2 R_μ^2 + \alpha^2 R_μ^2 X_2'^2} -$$

мнимая часть сопротивления.

В нагрузочных режимах ток статорной цепи не может быть равным нулю $(I_1 \neq 0)$, тогда для выполнения равенства (3) получим:

$$Z_Σ = Z_3 + Z_2 + Z_1 = \mathrm{Re}(Z_Σ) + I_m(Z_Σ) = 0. \qquad (4)$$

В результате несложных математических преобразований получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} (C_1 X_μ^2 + C_2 X_μ + C_3)\alpha^4 + (C_4 X_μ^2 + C_5 X_μ + C_6)\alpha^3 + \\ + (C_7 X_μ^2 + C_8 X_μ + C_9)\alpha^2 + C_{10}\alpha + C_{11} = 0; \\ (D_1 X_μ^2 + D_2 X_μ + D_3)\alpha^5 + (D_4 X_μ^2 + D_5 X_μ + D_6)\alpha^4 + \\ + (D_7 X_μ^2 + D_8 X_μ + D_9)\alpha^3 + D_{10}\alpha^2 + D_{11}\alpha = 0, \end{cases} \qquad (5)$$

где коэффициенты C_1–C_{11} и D_1–D_{11} являются функциями параметров генератора, эквивалентных сопротивлений двигателя, емкостного возбуждения и скорости вращения.

Путем совместного решения уравнений системы (5) могут быть получены значения реактивного сопротивления контура намагничивания АГ и относительная частота генерируемого напряжения. После этого напряжение генератора может быть вычислено согласно характеристике намагничивания $U = f(I_μ)$, а действующее напряжение в цепи определяется

аналитически либо графически на основе характеристики заряда конденсаторной батареи $U = f(I_c)$. Далее алгоритм расчета повторяется согласно полученным значениям напряжения $U_г$, частоты f, реактивного сопротивления $X_{цн}$ и скольжения АД $s_д$ до достижения допустимой ошибки последних двух итераций.

На основе разработанного метода для АД с короткозамкнутым ротором общепромышленного исполнения типа АИР80А4СУ2 ($P_н$ = 1,2 кВт; $n_н$ = 2740 об/мин; $I_н$ = 2,93 А; R_1 = 9,37 Ом; R_2 = 5,13 Ом; X_1 = 7,03 Ом; X_2 = 6,50 Ом), работающего в генераторном режиме с емкостным возбуждением C = 30 мкФ, были рассчитаны характеристики при работе на активную и активно-индуктивную нагрузки (рис. 5–7).

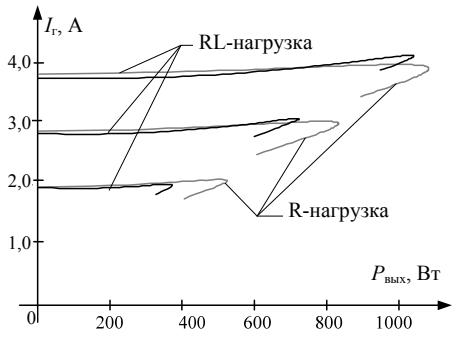

Рис. 5. Зависимость тока генератора от выходной мощности при емкости возбуждения 30, 40, 50 мкФ

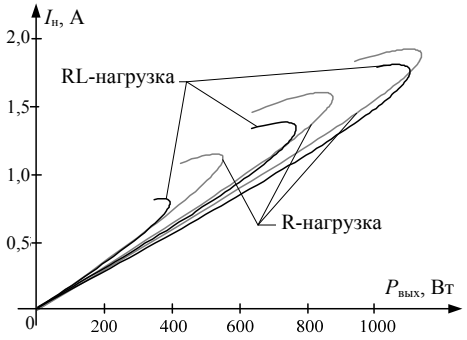

Рис. 6. Зависимость тока нагрузки от выходной мощности генератора при емкости возбуждения 30, 40, 50 мкФ

На рис. 7 кривая 1 – внешняя характеристика АГ, рассчитанная по предлагаемому методу, кривая 2 – характеристика генератора без учета изменения частоты питающего напряжения.

Из приведенных на рис. 7 характеристик следует, что в случае АГ малой мощности неучет вызванного нагрузкой изменения частоты приводит к значительным погрешностям при анализе его нагрузочных возможностей и в результате – к неточной информации относительно характеристик ЕСВ, а именно: емкости и количества ступеней регулировочных конденсаторов.

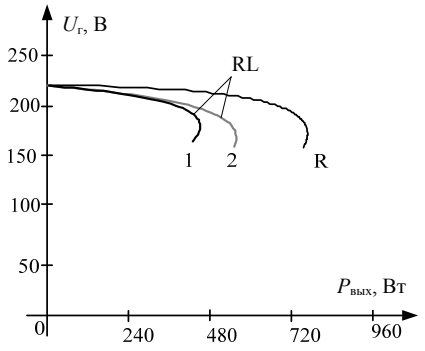

Рис. 7. Зависимость напряжения генератора от выходной мощности

Приведенный метод расчета статических характеристик системы АГ – нагрузка использовался для оценки свойств АГ, построенного на базе типового двигателя с короткозамкнутым ротором типа АИР80А4СУ2 с но-

минальной мощностью 1,2 кВт, и анализа влияния параметров ЕСВ на эти характеристики. Результаты расчетов приведены на рис. 8, 9.

Как следует из характеристик рис. 8, при увеличении расчетного значения начальной емкости возбуждения ($C_{расч}$ = 27 мкФ) возрастает перегрузочная способность и увеличивается жесткость механических характеристик АГ.

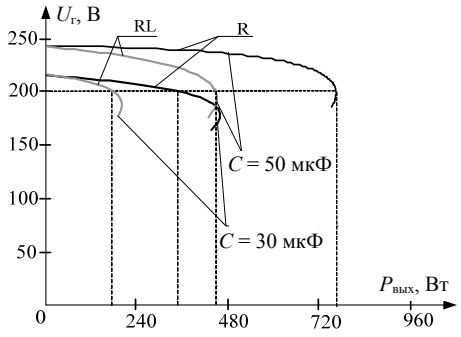

Рис. 8. Зависимость напряжения генератора от мощности нагрузки при емкости возбуждения 30 и 50 мкФ

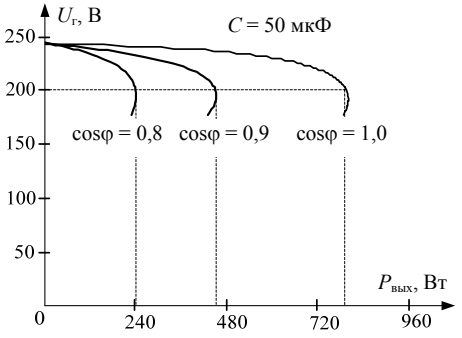

Рис. 9. Внешние характеристики генератора при изменяющемся коэффициенте мощности активно-индуктивной нагрузки

Так, при емкости возбуждения C = 30 мкФ (σ = 1,2 и соответствует двигательному режиму данной АМ) перегрузочная способность генератора составляет 0,375, а согласно требованиям [12] при допущении 10 % снижения напряжения перегрузочная способность генератора составляет всего 0,300 при активной нагрузке (cosφ = 1,0). Нагрузочные способности генератора уменьшаются еще более при работе на потребителей с активно-индуктивным характером. Как следует из рис. 8, при емкости C = 30 мкФ перегрузочная способность с учетом требования по качеству электроэнергии составляет всего 0,15 (cosφ = 0,9).

Увеличение начальной емкости возбуждения до 50 мкФ (σ = 2,3) приводит к перенасыщению магнитной системы генератора, но при этом перегрузочная способность увеличивается до 0,60 для активной и до 0,37 для активно-индуктивной нагрузок. Следует заметить, что в этом случае увеличиваются токи, протекающие по контуру АГ–ЕСВ (рис. 5), что приводит к перегреву машины и увеличению потерь мощности.

Влияние изменения характера нагрузки на внешние характеристики приведено на рис. 9. Как видно из рисунка, уменьшение коэффициента мощности активно-индуктивной нагрузки приводит к значительному уменьшению перегрузочной способности АГ. Кроме того, в значительной степени снижается и жесткость механических характеристик. Так, для представленного генератора уменьшение коэффициента мощности активно-индуктивной нагрузки с cosφ = 1,0 до cosφ = 0,8 даже при практически в два раза увеличенной начальной емкости возбуждения (C = 50 мкФ) приводит к снижению перегрузочной способности более чем в три раза. Этот факт практически исключает применение АГ для электроснабжения активно-индуктивных потребителей без систем стабилизации напряжения.

На рис. 10, 11 представлены характеристики исследуемого АГ при различной частоте вращения приводного двигателя (ПД). Как видно из рис. 10, 11, для обеспечения требуемого значения напряжения на зажимах потребителя при уменьшении частоты вращения $\omega_р$ параметры емкостной

батареи конденсаторов необходимо значительно увеличивать, исходя из условий [13]:

$$C = \begin{cases} C_{\text{расч}} \left(\dfrac{\omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{н}}} \right)^2, & \text{при} \quad \omega_{\text{р}} \geq \omega_{\text{н}}; \\ C_{\text{расч}} \left(\dfrac{\omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{н}}} \right)^4, & \text{при} \quad \omega_{\text{р}} < \omega_{\text{н}}, \end{cases} \tag{6}$$

где $\omega_{\text{р}}$, $\omega_{\text{н}}$ – фактическая и номинальная частота вращения ротора АГ.

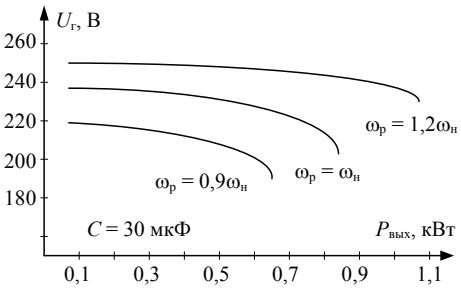

Рис. 10. Внешняя характеристика АГ при различной скорости вращения ПД

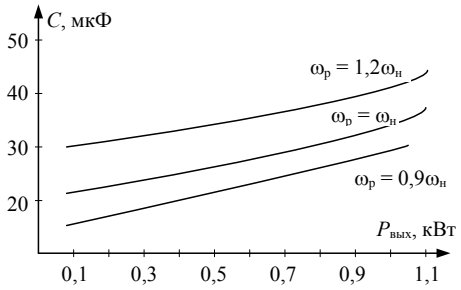

Рис. 11. Зависимость $P_{\text{вых}} = f(C)$ при различной скорости вращения ПД

Исходя из рис. 10, 11, а также на основании (6) следует, что с целью минимизации технико-экономических затрат на дополнительную емкостную систему стабилизации напряжения приводные двигатели в составе автономного источника электроэнергии должны обеспечивать частоту вращения ротора АГ не ниже $\dfrac{\omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{н}}} \leq 0{,}9$.

Для проверки адекватности предлагаемого метода по расчету статических характеристик системы АГ–ЕСВ–нагрузка были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 12, 13 (экспериментальные характеристики показаны сплошными линиями, а расчетные – пунктирными).

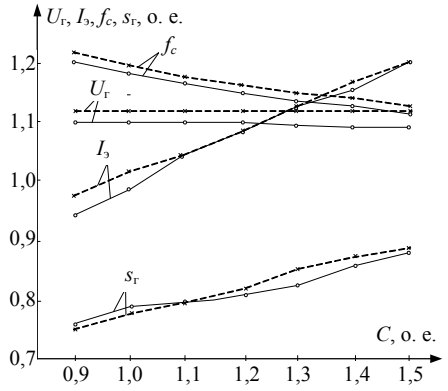

Рис. 12. Характеристики АГ при изменении емкости возбуждения ($R = 0{,}8R_{\text{н}}$)

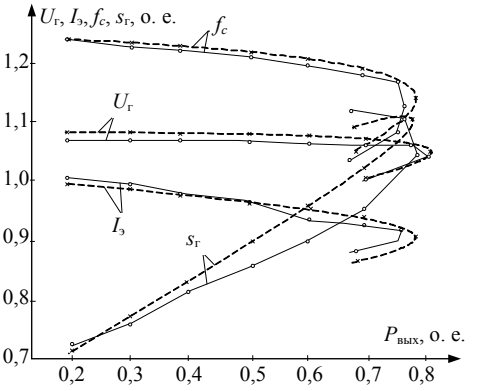

Рис. 13. Характеристики АГ от полезной мощности и емкости возбуждения ($C = C_{\text{н}}$)

Таким образом, предложенный алгоритм является эффективным при анализе статических режимов работы системы АГ–нагрузка с учетом изменения частоты питания. Сравнительная характеристика теоретических и экспериментальных исследований показала, что расхождение между данными не превышает 4–6 %.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод расчета статических характеристик системы АГ–АД, учитывающий изменения частоты напряжения, обусловленной нагрузкой, обеспечивает более высокую точность расчетов по сравнению с существующими, необходимую и достаточную для проектирования автономных источников энергии малой мощности на базе асинхронного генератора.

Увеличение начальной емкости возбуждения, способствующее большому насыщению магнитной системы АГ, повышает его перегрузочную способность и жесткость внешних характеристик. Однако следует иметь в виду, что с ростом насыщения магнитопровода увеличиваются токи системы АГ–ЕСВ, приводящие к перегреву машины и увеличению потерь мощности. Кроме того, вследствие активно-индуктивного характера большинства потребителей электроэнергии использование источников энергии на базе асинхронного генератора возможно лишь с применением систем стабилизации напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кицис, С. И. Асинхронные самовозбуждающиеся генераторы / С. И. Кицис. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 328 с.

2. Лищенко, А. И. Исследование рабочих характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением / А. И. Лищенко, В. А. Лесник, В. А. Фаренюк // Техническая электродинамика. – 1983. – № 5. – С. 62–68.

3. Радин, В. И. Применение асинхронных генераторов как автономных источников переменного тока / В. И. Радин, В. А. Винокуров // Электротехника. – 1967. – № 8. – С. 17–20.

4. Зубков, Ю. Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением / Ю. Д. Зубков. – Алма-Ата: АН Каз. ССР, 1949. – С. 112.

5. Кюрегян, С. Г. Расчет рабочих характеристик автономного асинхронного генератора / С. Г. Кюрегян, А. М. Ткаченко // Электротехника. – 1966. – № 11. – С. 20–22.

6. Кицис, С. И. Расчет стационарных режимов асинхронного генератора с обмоткой подмагничивания, присоединенной к обмотке статора / С. И. Кицис // Электричество. – 1978. – № 5. – С. 28–31.

7. Балагуров, В. А. Построение внешних характеристик асинхронного генератора / В. А. Балагуров, А. А. Кецарис // Электротехника. – 1974. – № 2. – С. 24–26.

8. Singh, S. P. Performance Charakteristics and Optimum Utilization of a Cage Machine Induction Generator / S. P. Singh, M. P. Jain // IEEE Trans, on En. Conv. – 1990. – Vol. 5, No 4. – P. 679–685.

9. Williamson, S. Induction Motor Modeling Using Finite Elements / S. Williamson // International Conf. on Electr. Mach., ICEM'94. – 1994. – Vol. 1. – P. 1–8.

10. Гентковски, З. Схемно-полевая модель электромагнитных процессов в автономном асинхронном генераторе с конденсаторным возбуждением / З. Гентковски, А. Деменко, Б. Плахта // Техническая электродинамика / НАН Украины. – 1996. – № 1/2. – С. 37–46.

11. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л. Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 528 с.

12. Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования: ГОСТ Р 50783–95. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 27 с.

13. Вишневский, Л. В. Системы управления асинхронными генераторными комплексами / Л. В. Вишневский, А. Е. Пасс. – Киев: Либідь, 1990. – 168 с.

Представлена кафедрой САУЕ Поступила 25.04.2012