

**ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА  
НА АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ**

Ю. А. РОМАНОВ, Г. А. СИПАЙЛОВ, А. В. ЛООС, В. Ф. СЕРГЕЕВ

С появлением потребности в малогабаритных источниках импульсной мощности обнаруживаются большие возможности эффективного применения асинхронных генераторов с относительно высокой максимальной мощностью.

Асинхронные генераторы (АГ) с короткозамкнутым ротором обладают рядом преимуществ, которые могут оказаться решающими при выборе экономичных источников для малогабаритных автономных блоков питания. К подобного рода источникам предъявляются требования высокой эксплуатационной надежности, малого удельного веса и высокой плотности энергии, запасаемой в маховых массах [1, 2]. Не имея вращающихся обмоток, магнитов, вентилях, возбудителей, эти машины являются наиболее простыми и надежными и могут работать при больших скоростях вращения.

В ряде специальных установок оказывается полезной универсальность асинхронных машин. Питая АГ от внешнего источника, можно приводить во вращение сопряженные с ним механизмы и в случае необходимости работать в генераторном режиме, преобразуя энергию маховых масс в электромагнитную. В подобном режиме работает специальный электромеханический накопитель, применяющийся в космических исследованиях [2]. Преимущества АГ как источника импульсной мощности проявляются в процессе развития новой техники.

Однако развитию теории работы асинхронного генератора в импульсном режиме на активную нагрузку до сих пор не уделялось достаточного внимания. В частности, неизвестно влияние отдельных параметров ротора и статора на величину энергии, передаваемой в нагрузку, нет расчетных соотношений для выбора согласованного сопротивления нагрузки, не исследована реакция якоря асинхронного ударного генератора и т. д.

Целью настоящей работы является исследование импульсного режима работы асинхронного генератора на активную нагрузку.

**Математическое моделирование переходных процессов АГ**

Полная система уравнений однофазного асинхронного генератора в осях  $\alpha$ ,  $\beta$ , работающего на активную нагрузку, имеет следующий вид [3]:

уравнения напряжений

$$\begin{aligned}p\Psi_{\alpha} &= -i_{\alpha}R_{\alpha} - U_c; \\p\Psi_{\alpha r} &= -i_{\alpha r}R_r - \omega_r\Psi_{\beta r}; \\p\Psi_{\beta r} &= -i_{\beta r}R_r + \omega_r\Psi_{\alpha r}; \\pU_c &= x_c i_{\alpha};\end{aligned}$$

уравнения токов

$$\begin{aligned}i_{\alpha} &= \frac{1}{x_{ad}} (\Psi_{\delta\alpha} + \Delta\Psi_{\delta\alpha}) - i_{\alpha r}; \\i_{\alpha r} &= \frac{1}{x_{\sigma r}} (\Psi_{\alpha r} - \Psi_{\delta\alpha}); \\i_{\beta r} &= \frac{1}{x_{ad}} (\Psi_{\delta\beta} + \Delta\Psi_{\delta\beta}); \\i_c &= i_{\alpha} - i_H; \\i_H &= \frac{U_c}{R_H};\end{aligned}$$

уравнения потокосцеплений

$$\begin{aligned}\Psi_{\delta\alpha} &= \Psi_{\alpha} - x_{\sigma s} \cdot i_{\alpha}; \\ \Psi_{\delta\beta} &= \Psi_{\beta r} - x_{\sigma r} \cdot i_{\beta r}; \\ \Psi_{\delta} &= \sqrt{\Psi_{\delta\alpha}^2 + \Psi_{\delta\beta}^2};\end{aligned}$$

уравнение движения ротора

$$p\omega_r = \frac{1}{H_j} (M_m - i_{\alpha} \Psi_{\delta\beta}).$$

Уравнения записаны в относительных единицах, обозначения соответствуют принятым в работе [4]. За базовые величины приняты номинальные фазовые значения тока и напряжения генератора и синхронная скорость.

Структурная схема решения системы дифференциальных уравнений приведена на рис. 1.

При этом в качестве исходных принимались следующие значения параметров в относительных единицах.

$$\begin{aligned}x_{ad} &= 1; \quad x_{\sigma s} = 0,04; \quad x_{\sigma r} = 0,01; \quad x_c = 0,4; \\ R_{\alpha} &= 0,005; \quad R_r = 0,005; \quad \omega_r = 1.\end{aligned}$$

На первом этапе работы генератора происходит самовозбуждение. На реальной установке это происходит при подключении емкости, на математической модели подачей команды «пуск» для выбранных исходных параметров генератора и при  $R_H = \infty$ . Расчеты проводились на вычислительной машине МН-14.

Процесс возбуждения как на структурной схеме, так и на экспериментальной установке генератора фиксируется визуально на экране осциллографа. Увеличение магнитного потока контролируется на выходе функционального блока 1БН. При достижении результирующим потоком в воздушном зазоре (по структурной схеме) номинального значения  $\Psi_{\delta} = 1$  производится включение нагрузки в момент равенства нулю напряжения на емкости.

## Результаты исследований

Исследования по структурной схеме однофазной машины проводились при ненулевых начальных значениях на интеграторах, соответствующих возбужденному состоянию физической модели в момент подклю-

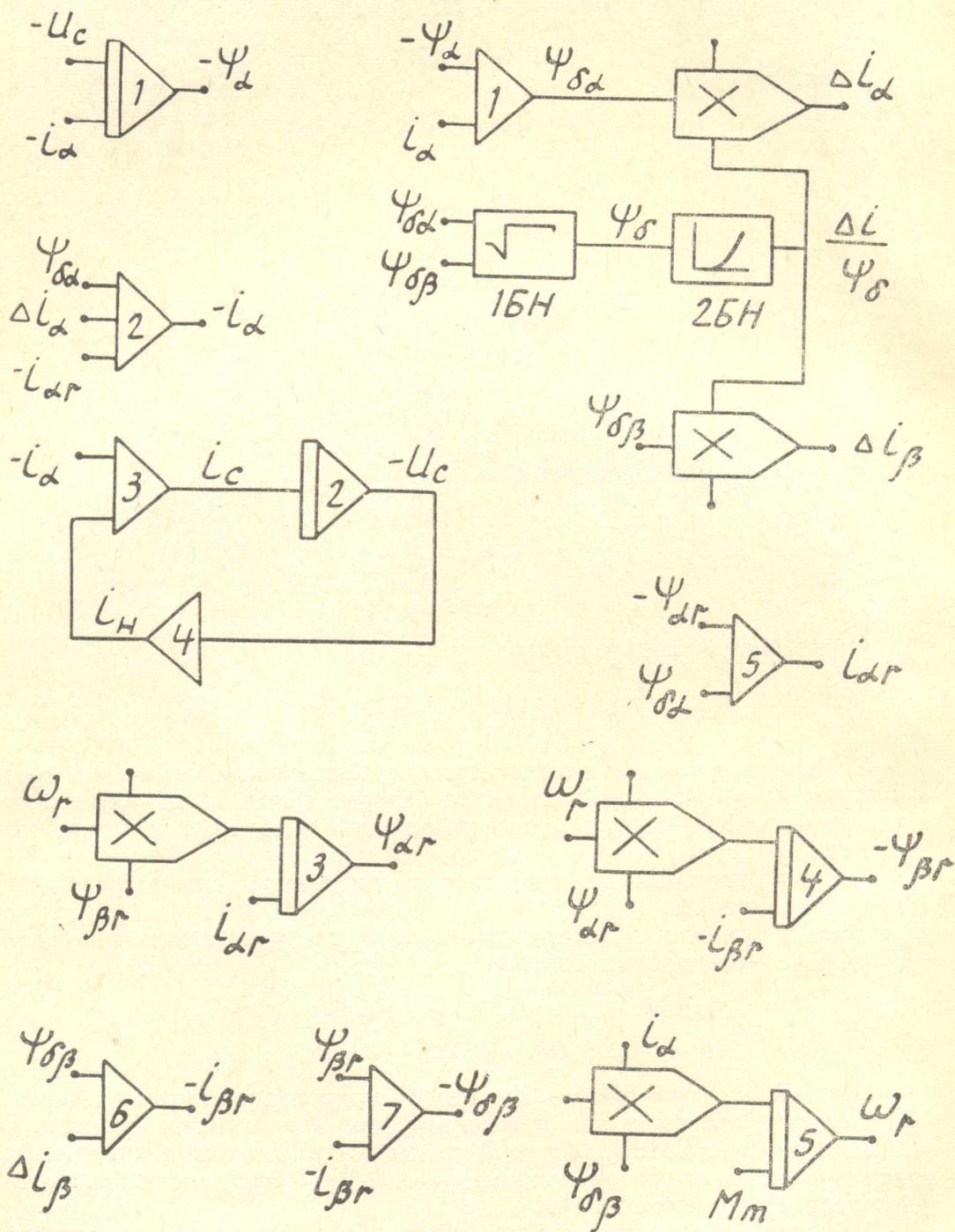


Рис. 1. Структурная схема решения системы дифференциальных уравнений

чения нагрузки. За базисные единицы приняты следующие величины:

$I_\delta$  — величина тока возбуждения обмотки статора, при котором результирующий магнитный поток в воздушном зазоре асинхронного генератора достигает своего номинального значения;

$W_{\delta} = 0,5U_{\delta}I_{\delta}\sigma \Delta\tau$  — базисная энергия, соответствующая номинальной мощности генератора за время  $\Delta\tau = \pi$ .

Максимальная энергия, передаваемая в нагрузку за один импульс, вычислялась по формуле

$$W_{н} = \frac{0,5U_{\delta} I_{\delta} \Delta\tau}{W_{\delta}} = I_{\delta}^2 R_{н}.$$

1. Генератор со сверхпроводящей обмоткой ротора и активным сопротивлением статора, равным нулю. Исследование подобного генератора, обладающего чисто индуктивным сверхпереходным сопротивлением, представляет в основном теоретический интерес. Эти исследования позволяют вскрыть качественную картину влияния характера нагрузки на согласованный режим генератора, т. е. определить величину сопротивления нагрузки, когда генератор передает максимум энергии.

На рис. 2, а представлены результаты расчетов по полной системе уравнений зависимости энергии в активной нагрузке от величины ее сопротивления при различных сверхпереходных сопротивлениях генератора. Все другие параметры генератора при этом оставались постоянными и были равны (в относительных единицах)

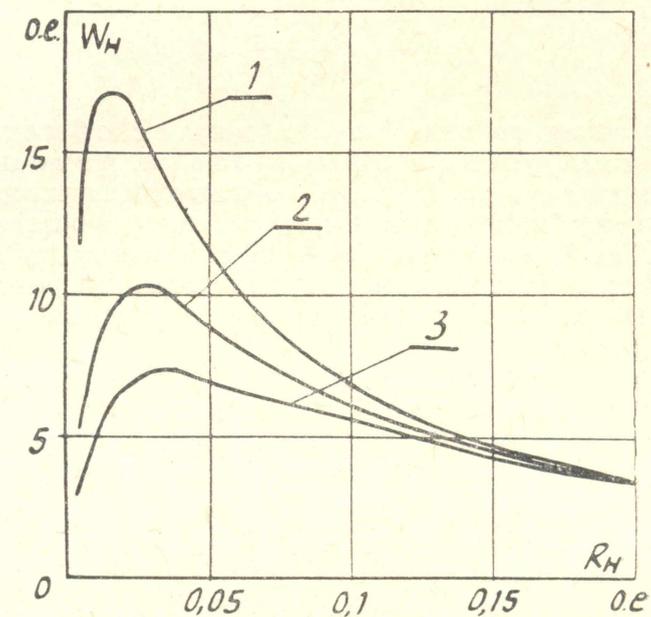
$$x_{ад} = 1; x_{\delta r} = 0,01; R_r = 0; R_{\alpha} = 0; C = 0.$$

Кривые 1, 2, 3, приведенные на рис. 2, а, даны для сверхпереходных сопротивлений  $x'_{\alpha} = 0,03; 0,05; 0,07$  соответственно. Как следует из расчетов, максимальное значение энергии в нагрузке соответствует  $R_{н}$  несколько меньших  $x'_{\alpha}$ . Следовательно, величина согласованной нагрузки при активном и индуктивном сопротивлениях различна. Причем отклонение сопротивления особенно сказывается на величину передаваемой энергии при малых сверхпереходных сопротивлениях, т. е. для крупных машин.

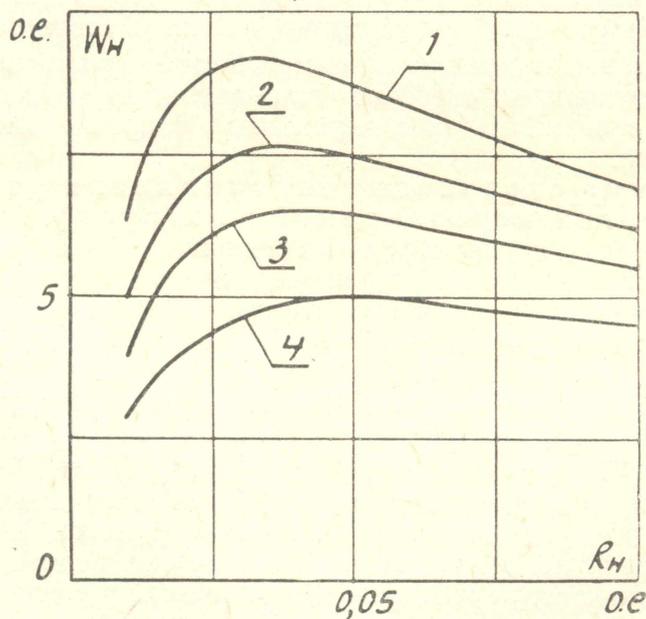
2. Влияние активного сопротивления ротора на величину энергии, передаваемой в нагрузку. Активное сопротивление статора в данном случае принято постоянным и равным  $R_{\alpha} = 0,005$ . На рис. 2, б показаны зависимости энергии нагрузки от величины ее сопротивления при различных активных сопротивлениях роторных цепей (кривая 1 —  $R_r = 0$ , 2 —  $R_r = 0,01$ , 3 —  $R_r = 0,02$ , 4 —  $R_r = 0,04$ ) для параметров генератора  $x_{\sigma s} = 0,04$ ,  $x_{\sigma r} = 0,01$ .

Сравнивая результаты по рис. 2, а (кривая 2) и рис. 2, б (кривая 1), можно отметить, что при отсутствии влияния реакции якоря появление активной составляющей сопротивления статора  $R_{\alpha} = 0,1 |x'_{\alpha}|$  и, следовательно, нового потребителя энергии, уменьшает максимум энергии в нагрузке на 10%, сколько-нибудь заметного увеличения согласованного сопротивления не наблюдается. Уменьшение величины постоянной времени обмотки ротора приводит к естественному снижению максимума передаваемой энергии в нагрузку. Так, при изменении постоянных времени ротора  $T_r = 100, 50$  рад (кривые 2 и 3) уменьшение энергии в нагрузке составляет порядка 20 и 40% соответственно относительно генератора с  $R_r = 0$ . Столь заметное влияние  $T_r$  на зависимость  $W_{н} = f(R_{н})$  объясняется, с одной стороны, размагничивающим действием реакции якоря, с другой — характером изменения переменных величин, участвующих в переходном процессе. По своей природе все переменные величины: потокосцепления, токи во всех контурах и напряжения — не имеют принужденной составляющей, т. е. процесс является свободным и все переменные затухают. Практически это подтверждается тем, что при подключении нагрузки генератор не в состоянии самовозбуждаться.

Как следует из рис. 2, б, для малых машин величина согласованной нагрузки приближается к значениям переходного сопротивления асинхронного генератора, это упрощает выбор оптимального сопротивления



a)



б)

Рис. 2

без учета емкости. Для значений параметров  $x_a = 1,04$ ;  $R_a = 0,005$ ;  $T_r = (50-100)$  рад;  $x'_a = 0,05$  можно рекомендовать для выбора сопротивления нагрузки значения  $R_H = (0,04-0,06)$ .

3. Определение влияния активного и индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора на энерги-

тические характеристики генератора а. Исходные параметры генератора  $x_{\sigma s} = 0,04$ ;  $x_{r} = 0,01$ ;  $R_r = 0,005$ .

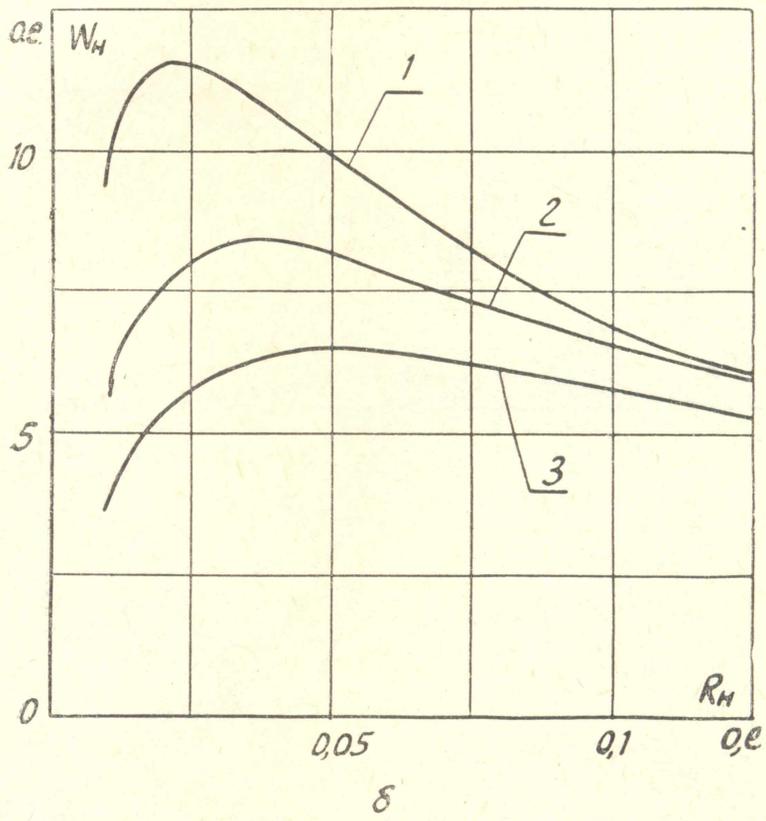
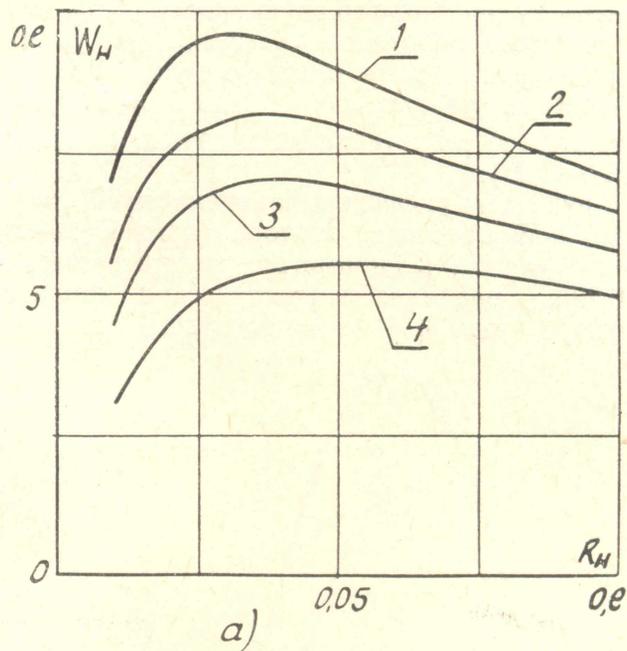


Рис. 3

Увеличение активного сопротивления статора приводит к общему увеличению сопротивления цепи генератор-нагрузка. Одновременно с этим увеличивается доля энергии, затраченная на потери.

На рис. 3, а приведены расчетные зависимости  $W_H = f(R_H)$  для различных активных сопротивлений статора асинхронного генератора (кривая 1 —  $R_\alpha = 0$ , 2 —  $R_\alpha = 0,005$ , 3 —  $R_\alpha = 0,01$ , 4 —  $R_\alpha = 0,02$ ). Здесь мы замечаем ту же характерную зависимость, что и на рис. 2, б. С увеличением общего сопротивления генератора уменьшается максимум энергии, увеличивается сопротивление согласованной нагрузки. Для параметров генератора равных  $x_\alpha = 1,04$ ,  $R_\alpha = 0,02$ ,  $x'_\alpha = 0,05$ ,  $T_r = 200$  рад, оптимальное сопротивление нагрузки можно выбрать в пределах  $R_H = (0,04—0,07)$ .

На рис. 3, б показаны расчетные зависимости  $W_H = f(R_H)$  для различных сопротивлений рассеяния статора (кривая 1 —  $x_{\sigma s} = 0,02$ , 2 —  $x_{\sigma s} = 0,04$ , 3 —  $x_{\sigma s} = 0,06$ ) и параметрах генератора  $R_\alpha = 0,005$ ,  $x_{\sigma r} = 0,01$ ,  $R_r = 0,005$ . Сравнивая энергетические характеристики асинхронного генератора (рис. 3, б) с характеристиками идеализированной

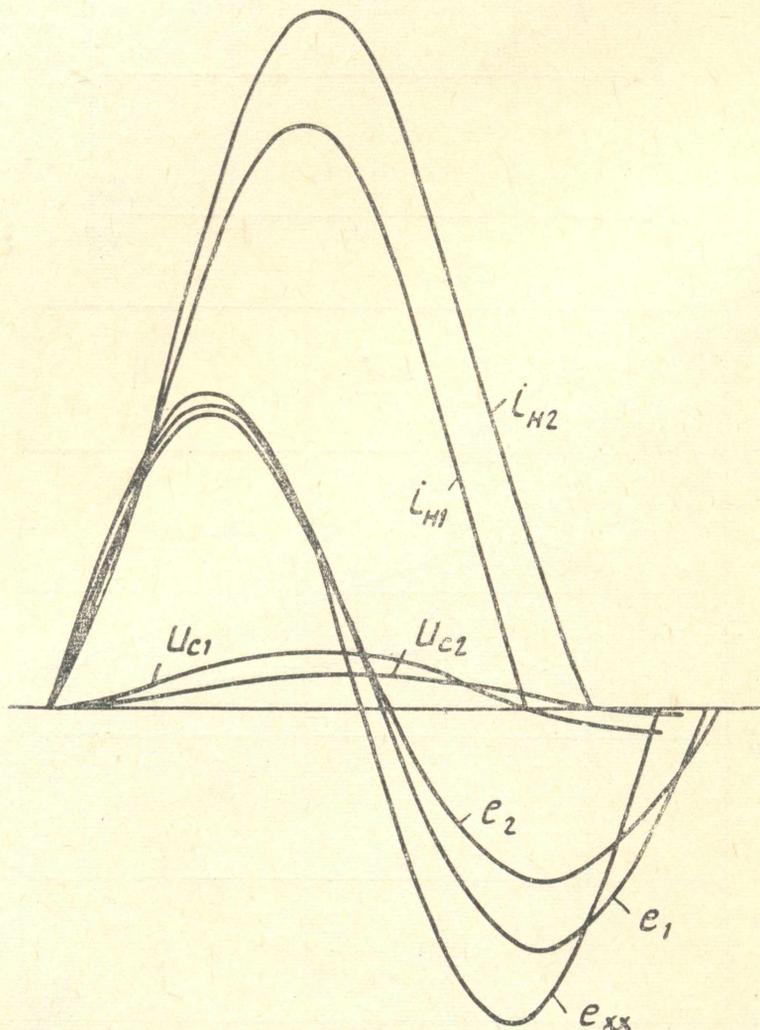


Рис. 4

машины (рис. 2, а), можно отметить следующее: энергетические показатели асинхронного генератора с постоянной времени  $T_r = 200$  рад определяются не только переходным сопротивлением  $x'_\alpha$ , но и степенью размагничивания машин. Так из сравнения указанных характеристик открывается следующая картина: при уменьшении  $x'_\alpha$  от 0,07 до 0,03 увеличение энергии в нагрузке для идеализированной машины (рис. 2, а)

составляет величину порядка 2,32 раза, а для асинхронной машины с  $T_r = 200 \text{ рад} — 1,77$  раза.

Для каждого значения  $x'_\alpha = 0,03; 0,05; 0,07$  уменьшение передаваемой энергии в нагрузку для реального асинхронного генератора относительно идеализированной машины составляет соответственно 48, 19 и 13%. Если же еще учесть наличие активного сопротивления статора у асинхронного генератора, то можно утверждать, что асинхронные генераторы малой мощности в однофазном исполнении будут иметь пониженные энергетические показатели (на 5—10%) относительно синхронных только за счет реакции якоря. Увеличение возбуждающей емкости не приводит к существенному уменьшению реакции якоря и увеличению энергии в нагрузке.

Размагничивающее действие реакции якоря в сильной степени зависит от величины нагрузки. На рис. 4 показаны осциллограммы токов нагрузки ( $i_{n1}$  и  $i_{n2}$ ), напряжений на емкости ( $U_{c1}$  и  $U_{c2}$ ), э. д. с. холостого хода ( $l_{xx}$ ) и э. д. с. генератора во время импульса тока ( $e_1$  и  $e_2$ ) для различных значений  $R_n$  (кривая 1 —  $R_n = 0,02$ , 2 —  $R_n = 0,01$ ) и параметров генератора  $x_{ad} = 1$ ,  $x'_\alpha = 0,05$ ,  $R_\alpha = R_r = 0,005$ .

Как видно из рис. 4, с увеличением тока нагрузки увеличивается длительность импульса со смещением максимума тока, что следует учитывать при определении энергии, потребляемой нагрузкой. Действие реакции якоря значительно и растет в сильной степени с ростом тока.

### Выводы

На основании выполненных исследований работы асинхронного ударного генератора на активную нагрузку можно сделать следующие основные выводы:

1. Величина согласованного сопротивления активной нагрузки не совпадает со значением сверхпереходного сопротивления асинхронного генератора. Наибольшие отклонения имеют место для крупных машин.

2. Для асинхронных генераторов малых габаритов величина согласованного сопротивления нагрузки приближается к значению сверхпереходного сопротивления асинхронного генератора. Это упрощает выбор оптимального сопротивления и позволяет производить его определение без учета возбуждающей емкости.

3. Для малых асинхронных генераторов сильное влияние на величину энергии в импульсе оказывает реакция якоря и характерное для режима подключения нагрузки затухание всех переменных величин, что обуславливает понижение энергетических показателей асинхронного генератора в сравнении с синхронным, имеющим такие же параметры, на 5—10%.

4. С ростом активного сопротивления ротора происходит уменьшение энергии, передаваемой в нагрузку, вследствие увеличения размагничивающего действия реакции якоря.

5. Энергетические показатели асинхронного генератора определяются не только переходным сопротивлением  $x'_\alpha$ , но и активным сопротивлением статорной обмотки и степенью размагничивания машины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Радин, В. А. Винокуров, В. С. Аскерко. Применение асинхронных генераторов как автономных источников переменного тока. «Электротехника», 1967, № 8.

2. Джон Роус. Электромеханическая система аккумуляции энергии для применения в космическом пространстве. Преобразование тепла и химической энергии в электроэнергию в ракетных системах. Изд-во «Энергия», Москва, 1963.

3. Ю. А. Романов, Г. А. Сипайлов. Анализ работы асинхронного ударного генератора с применением АВМ. «Известия ТПИ», т. 212, 1970.

4. Л. М. Грузов. Методы математического исследования электрических машин. Госэнергоиздат, 1953.