

УДК 621.313.332-523:621.316.722

**Ю.В. Зачена**

*(Украина, Кременчуг, Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского)*

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ СО ВСЕРЕЖИМНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

**Актуальность работы.** Изучение свойств асинхронного генератора (АГ), выбор алгоритмов управления его параметрами и определение рациональной конструкции регуляторов требуют разработки его математической модели, адекватно отражающей электромагнитные и электромеханические процессы в генераторе и системе управления в типовых режимах [1].

Для синтеза системы управления АГ необходимо знать его передаточные функции (ПФ) по каналам управления и возмущения. В зависимости от условий работы и требований к автономному источнику электропитания на базе асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением возможны различные способы построения систем автоматического управления (САУ) – от простых одноконтурных до сложных микропроцессорных систем стабилизации [1].

Поэтому целью работы является определение параметров и структуры дискретной системы стабилизации выходного напряжения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением.

**Материал и результаты исследований.** Асинхронный генератор с конденсаторным возбуждением представляет собой электромагнитный преобразователь механической энергии вращения ротора в электрическую энергию генерируемого тока [1]. Возникновение напряжения и тока в статорных обмотках АГ является результатом автоколебательного процесса в LC-контуре, образованного индуктивностью генератора и емкостью конденсаторов возбуждения.

На режимы работы генератора можно влиять изменением следующих параметров: частоты вращения ротора АГ (приводного двигателя)  $\omega_r$ , емкости конденсаторных батарей  $C$  и сопротивления нагрузки  $Z_n$ . При этом первые две величины относятся к задающим воздействиям, а ток  $I_n$  – к возмущающему.

Таким образом, АГ как объект управления можно представить в виде схемы (рис. 1):

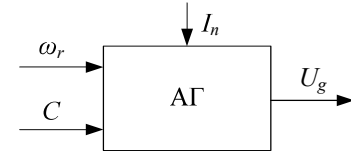


Рис. 1. Структурная схема АГ как объекта управления

В литературе [1, 2] приведены некоторые подходы по определению ПФ генератора. Сложность процессов самовозбуждения генератора, существенная нелинейность процесса намагничивания железа машины, заряда конденсаторов и ряд других причин не позволяют получить простые уравнения генератора как объекта управления. Однако все исследователи сходятся в одном – особенностью переходного процесса в асинхронном генераторе является то, что он складывается из двух различных по времени протекания процессов [1]: во-первых, медленного изменения главного потока намагничивания, вызванного небалансом реактивных проводимостей конденсаторов и генератора (процесса возбуждения, длительность которого достигает 50–70 периодов генерируемого тока); во-вторых, быстрого установления напряжения и частоты при изменении параметров системы при неизменном магнитном потоке в зазоре машины (процесса стабилизации длительностью 1–2 периода). Таким образом, передаточную функцию АГ можно описать аperiодическим звеном второго порядка, а линейризованную систему АГ–нагрузка можно представить в виде структурной схемы (рис. 2).

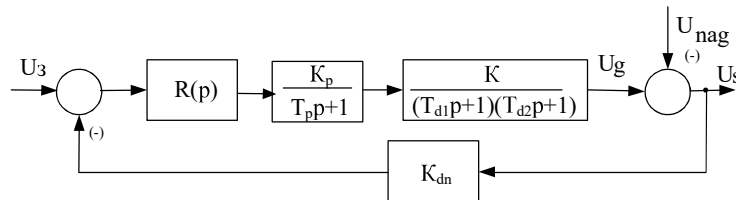


Рис. 2. Структурная схема контура регулирования напряжения АГ

При настройке на технический оптимум получим ПИ-регулятор напряжения с последовательной коррекцией

$$R(p) = \frac{T_{d1}}{2T_{\mu}K_{\Sigma}} + \frac{1}{2T_{\mu}K_{\Sigma}p} = K_{rn} + \frac{1}{T_{rn}p}, \quad (1)$$

где  $K_{\Sigma} = K_p K_{dn} K$  – общий коэффициент усиления разомкнутой системы;  $T_{\mu} = T_n + T_{d2}$  – малая некомпенсируемая постоянная времени контура;  $K$  – коэффициент передачи АГ;  $T_{d1}$  – большая постоянная времени АГ, характеризующая процесс возбуждения;  $T_{d2}$  – малая постоянная времени АГ, характеризующая процесс стабилизации напряжения.

Воспользуемся одним из современных методов синтеза в теории оптимального управления. В результате структурно-алгоритмического синтеза методом аналитического конструирования регуляторов, основанного на модифицированном принципе симметрии [3], получим алгоритм вида

$$u_{y_{rn}} = sad \left[ \left( \frac{\alpha_{10}}{p} + \alpha_{11} \right) (U_g^* - U_g) - \alpha_{12} p U_g - \alpha_{13} p U_1 \right], \quad (2)$$

где  $\alpha_{10} = \frac{1}{T_n + T_{d1} + T_{d2}}$ ;  $\alpha_{11} = 1$ ;  $\alpha_{12} = \frac{T_n T_{d1} + T_n T_{d2} + T_{d1} T_{d2}}{T_n + T_{d1} + T_{d2}}$ ;  $\alpha_{13} = \frac{T_n T_{d1} T_{d2}}{T_n + T_{d1} + T_{d2}}$ .

Алгоритм характеризуется регулятором с ПИ-структурой, но только в системе с последовательно-параллельной коррекцией. Однако применение данной системы подразумевает наличие наблюдателя состояния (НС), разграничивающего действие второй и третьей составляющих в уравнении (2) на этапе

возбуждения ( $U_1$ ) и этапе стабилизации ( $U_g$ ).

Результаты исследований синтезированных алгоритмов управления автономной системой энергопитания приведены на рис. 3. Используется трехфазная модель, описанная в работе [4].

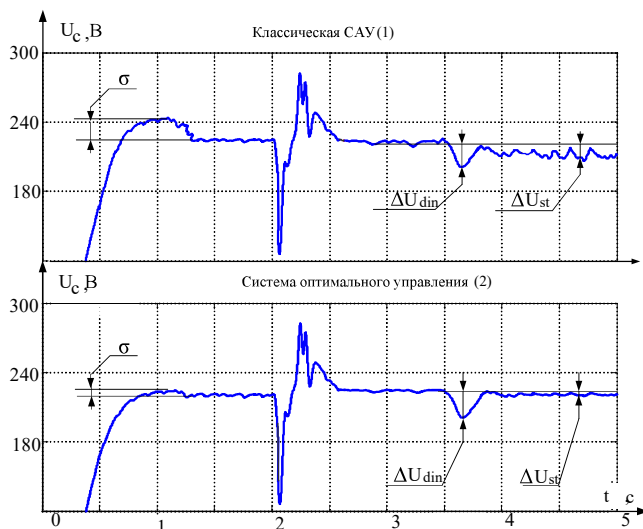


Рис. 3. Осциллограммы амплитуды пространственных векторов напряжения, тока статора и тока ротора АГ:  $P_g=1,2$  кВт при подключении АД  $P_d=560$  Вт и набросом нагрузки на 3,5 с

Сравнительная характеристика результатов компенсации возмущающих воздействий – подключение двигателя мощностью 560 Вт с последующим набросом нагрузки – сведены в таблицу.

Показатели качества работы систем стабилизации напряжения АГ		
Показатель	САУ	СОУ
	Пуск АД 560 Вт с набросом нагрузки	
$\Delta U_{st}, \%$	$\leq 12$	$\leq 1$
$\Delta U_{din}, \%$	37	37
$\sigma, \%$	10,6	3,6

Из таблицы видно, что СОУ характеризуется лучшими результатами работы по сравнению с САУ, но только в статических режимах работы либо при компенсации небольшой или медленно изменяющейся нагрузки. В противном случае САУ не компенсирует действия возмущающих воздействий ввиду небольших коэффициентов усиления регулятора, а в СОУ нет возможности произвести настройку порогового значения напряжения НС, что приводит к некорректности работы алгоритма (2). Кроме того, к общему недостатку обеих систем можно отнести начальное перевозбуждение АГ. Это связано с тем, что коммутируемая емкость во всех режимах больше емкости постоянно подключенных конденсаторов, поэтому подключение большей емкости на холостом ходу приводит к перенапряжениям (перерегулирование  $\sigma$ ), а отклонение ее под нагрузкой – к возможной потере возбуждения (включение АД на  $t = 2$  с), (рис. 3).

Для устранения отмеченных недостатков и с целью технической реализации указанных алгоритмов управления предлагается структура системы стабилизации напряжения асинхронных генераторных установок, представленная на рис. 4.

Асинхронный генератор имеет две системы управления: регулятор напряжения РН, коммутирующий посредством транзисторного ключа ТК

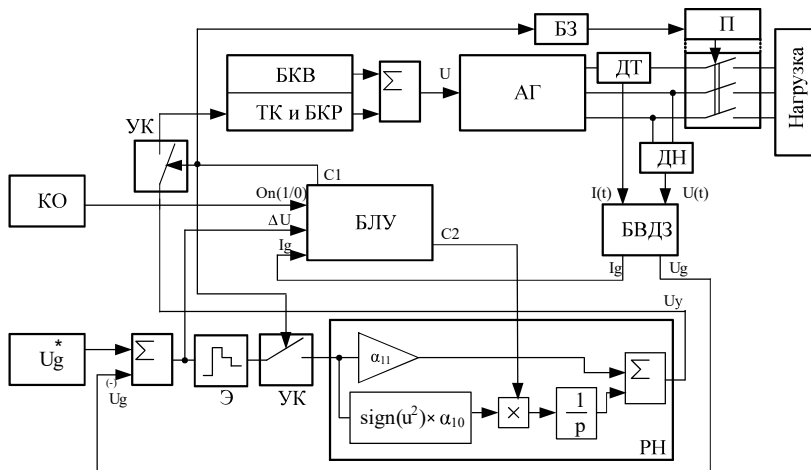


Рис. 4. Блок-схема САУ напряжения АГ с блоком логического управления

силовые конденсаторы БКР, и устройство подключения нагрузки – блок задержки БЗ и пускатель П. А начальное самовозбуждение генератор получает от коммутируемых конденсаторов возбуждения БКВ при отсутствии сигналов управления транзисторами ТК.

Система стабилизации напряжения содержит ПИ-регулятор, параметры которого определяются из алгоритма (2), выбранного в качестве эталонного, и блока логического управления БЛУ, который осуществляет параметрическую адаптацию интегральной составляющей регулятора РН (сигнал С2), а также управляет временем включения/отключения РН (сигнал С1), тем самым реализуя принцип зонного регулирования. Управление осуществляется по отклонению действующего значения напряжения  $U_g$ , определяемого посредством датчика напряжения ДН и блока вычисления действующего значения БВДЗ.

Основным достоинством предлагаемой схемы является реализация функций логического управления, обеспечивающих корректную работу системы в основных режимах. Фактически получена адаптивная система управления генераторной установкой с контролем времени ее включения и работы.

Начало работы определяется поступлением управляющего сигнала от командного органа КО на включение системы управления возбуждением (сигнал On 1/0). Блок логического управления непрерывно контролирует напряжение и ток с выхода генератора. Он разрешает работу системы только при условии отсутствия перегрузки по току. Если напряжение ниже заданного порога (при запуске системы или при срыве генерации), то контур автоматического регулирования отключен и получается прямое управление возбуждением, при котором емкость возбуждения остается постоянной.

При достижении выходным напряжением генератора порога  $0,8U_g^*$  БЛУ сигналом С1, посредством управляемого ключа УК, включает адаптивный ПИ-регулятор в контур управления возбуждением. Этим же сигналом через блок задержки БЗ подключается нагрузка. Время задержки определяется длительностью переходного процесса после момента включения регулятора.

В процессе регулирования осуществляется параметрическая адаптация ПИ-регулятора путем дискретного изменения коэффициента интегральной составляющей (сигнал С2) в зависимости от рассогласования по выходному напряжению генератора. При рассогласовании большем, чем 8 %, И-составляющая умножается на 0,85, т.е. становится меньше. При малых рассогласованиях базовое значение И-составляющей умножается на 1,18. Таким образом, уменьшается колебательность системы и перерегулирование, повышается точность и скорость компенсации статической ошибки.

Блок экстраполяции нулевого порядка Э необходим для снижения колебательности системы при кратковременных скачках напряжения, вызванных изменением нагрузки.

В ходе исследований был синтезирован алгоритм работы блока логического управления, в котором реализованы логические условия изменения управляющих сигналов С1 и С2. Алгоритм предусматривает временную паузу до отключения системы при увеличении нагрузки сверх установленного предела. Это обеспечит устойчивость системы при питании потребителей с собственными системами регулирования, имеющими значительные емкости, такими, как блоки бесперебойного питания и преобразователи частоты.

Упрощенный алгоритм изображен на рис. 5. Переменная counter представляет собой программный счетчик, обеспечивающий временную задержку при обнаружении перегрузки генератора. Отключение возбуждения происходит согласно условию превышения мгновенного значения тока или интеграла эффективного значения тока в течение некоторого времени. Логическая переменная flag служит для разделения ситуаций перегрузки и нормальной работы.

На рис. 6 изображены осциллограммы работы системы автоматического регулирования, симулирующие ситуацию подключения на  $t_1 = 1,5$  с и отключения на  $t_2 = 3$  с нагрузки. Хорошо заметны моменты переключения коэффициента регулятора в адаптивной системе (рис. 6, в). Из результатов сравнения си-

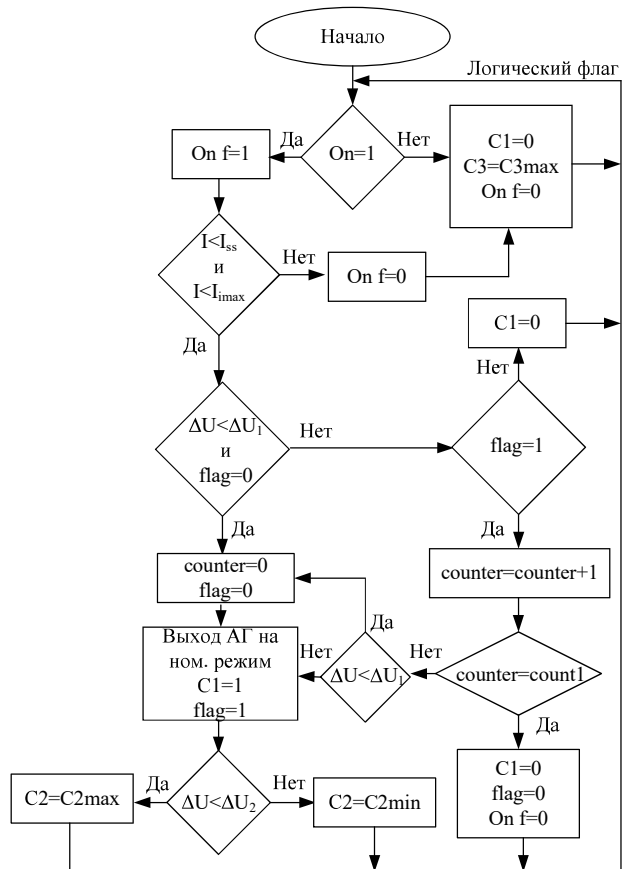


Рис. 5. Алгоритм работы блока логического управления

стем с постоянным и переменным коэффициентом И-составляющей можно отметить (рис. 6, з), что интеграл квадрата рассогласования напряжения на исследуемом временном промежутке меньше для адаптивной системы. Таким образом, обосновано применение алгоритмов адаптации в автономных системах электроснабжения с асинхронными генераторами.

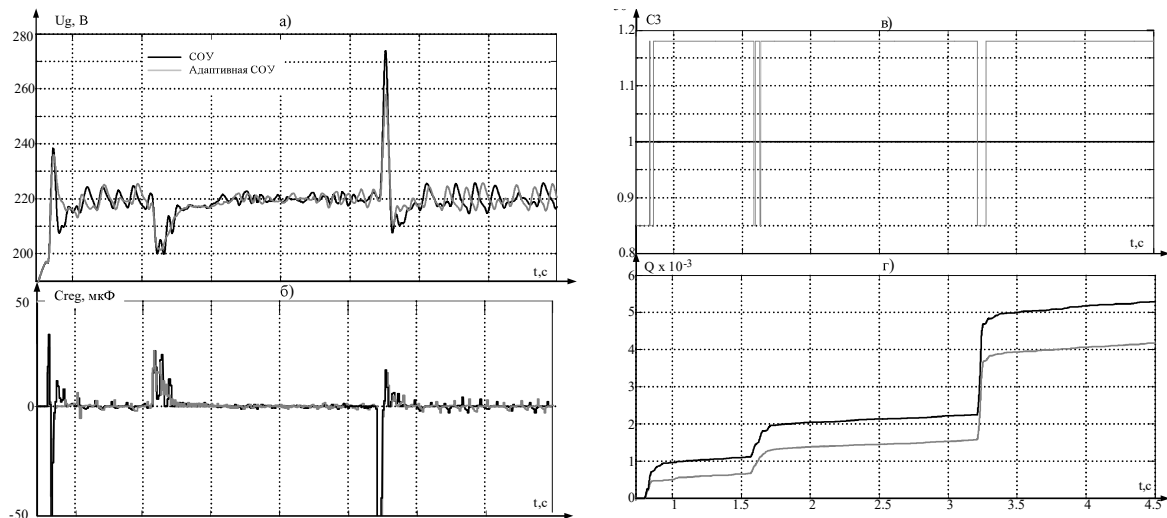


Рис. 6. Осциллограммы напряжения АГ (а); б) добавочной емкости (б); сигнала параметрической адаптации И-составляющей регулятора (в); квадрата ошибки рассогласования по  $U_g$  (г)

**Выводы.** На основании анализа работы полученных САУ доказано, что применение метода аналитического конструирования регуляторов на основе модифицированного принципа симметрии позволяет определить параметры регулятора напряжения АГ по каналу возбуждения генератора, обеспечивающие инвариантность к возмущениям, и астатические свойства системы.

Предлагаемая в работе адаптивная система стабилизации выходного напряжения АГ, в которой регулирование емкостного тока возбуждения осуществляется путем изменения интегральной составляющей регулятора, позволяет более чем на 20 % повысить точность и уменьшить перерегулирование. Применение принципа зонного регулирования уменьшает колебания выходного напряжения генератора.

#### Список литературы

1. Вишнеvский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. – К. – Одесса: Лыбидь, 1990. – 168 с.
2. Вишнеvский Л.В., Муха Н.И. Постоянные времена асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 1999. – Вип. 53. – С. 74–75.
3. Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами. – К. ИСИМО, 1996. – 298 с
4. Zachepa Y. Research of the operation of the autonomous asynchronous generator with typical AC customers / XIII International PhD Workshop OWD 2011 – Wisla, 22–25 October 2011. – PP. 413–418.