

УДК 681.5.013

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**В. Ф. Шишляков,**

доктор техн. наук, профессор

**Д. В. Шишляков,**

аспирант

**С. А. Цветков,**

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Приводятся результаты исследований аномальных режимов работы автономной электроэнергетической установки с синтезированными обобщенным методом Галеркина параметрами при внешних возмущающих воздействиях на входах приводного двигателя и синхронного генератора.

**Ключевые слова** — автономная электроэнергетическая установка, режимы работы, внешние воздействия.

Авторами было подробно рассмотрено решение задачи синтеза многосвязной системы автоматического управления автономной электроэнергетической установки (ЭЭУ) [1], структурная схема математической модели которой показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения:

$\Delta u_r(t) = u_{r0}(t) - u_r(t)$  — относительное изменение напряжения, здесь  $u_{r0}(t)$  — заданное значение напряжения на выходе ЭЭУ;  $u_r(t)$  — напряжение на выходе ЭЭУ;

$\Delta v(t) = v_0(t) - v(t)$  — относительное изменение скорости вращения приводного двигателя, здесь  $v_0(t)$  — заданное значение скорости (частоты напряжения на выходе установки),  $v(t)$  — скорость вращения приводного двигателя (частота напряжения на выходе ЭЭУ);

$g_v(t)$  — внешнее возмущающее воздействие в канале изменения частоты, действующее на приводной двигатель;

$g_u(t)$  — внешнее возмущающее воздействие в канале регулирования напряжения, действующее на синхронный генератор;

$u_B(t)$  — напряжение на зажимах возбудителя;

$u_{B,B}(t)$  — напряжение на обмотке возбуждения возбудителя;

$T_M = 1$  с — постоянная времени приводного двигателя;

$T_B = 0,01$  с — постоянная времени возбудителя;

$T_{B1} = 0,5$  с;  $T_{B2} = 0,01$  с — постоянные времени синхронного генератора, обусловленные индуктивностью цепи возбуждения и реакцией якоря;

$(1 - \gamma) = 0,8$  — коэффициент, характеризующий режим работы синхронного генератора;

$T_{v1}, \dots, T_{v5}, k_v$  — постоянные времени и коэффициент регулятора скорости вращения приводного двигателя;  $T_{u1}, T_{u2}, T_{u3}, k_u$  — постоянные времени и коэффициент передачи регулятора напряжения ЭЭУ;  $T_{o.c1}, T_{o.c2}$  — постоянные времени звена коррекции в цепи гибкой обратной связи (ГОС).

В результате решения данной задачи обобщенным методом Галеркина [2–5] были определены значения 12 параметров регуляторов в каналах регулирования напряжения и частоты (табл. 1).

Вычислительная модель (рис. 2) получена путем эквивалентных преобразований структурной схемы математической модели ЭЭУ с учетом особенностей применяемого для моделирования программного обеспечения Matlab Simulink.

**Определение амплитуд возмущающих воздействий для моделирования аномальных режимов работы ЭЭУ.** Для моделирования аномальных режимов работы требуется подавать внешние возмущающие воздействия определенной амплитуды на входы приводного двигателя, что соответствует изменению напряжения управления исполнительного двигателя, и синхронного генератора, что соответствует изменению напряжения возбудителя. Для оценки требуемых величин внешних возмущающих воздействий был проведен анализ процессов изменения сигналов на входах приводного двигателя и генератора

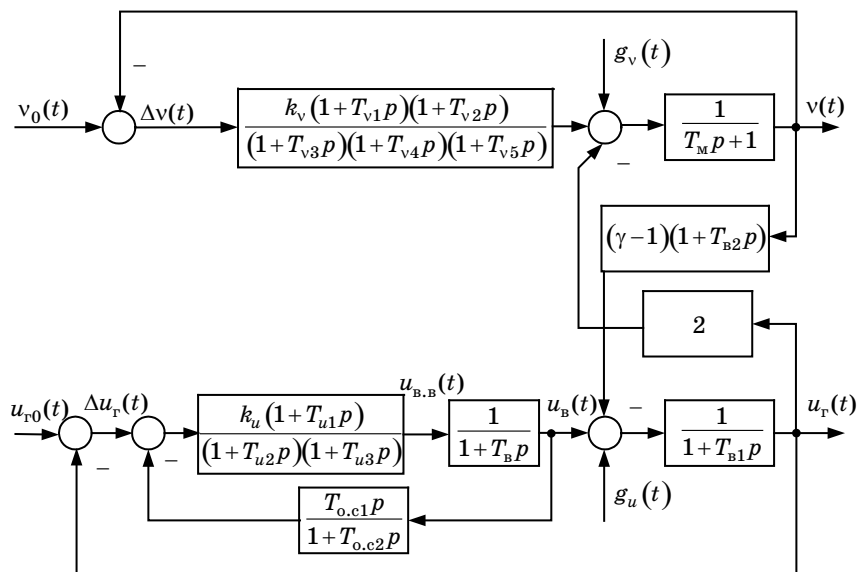


Рис. 1. Структурная схема математической модели ЭЭУ

Таблица 1. Значения варьируемых параметров ЭЭУ

Регулятор частоты						Регулятор напряжения				ГОС	
$k_v$	$T_{v1}, c$	$T_{v2}, c$	$T_{v3}, c$	$T_{v4}, c$	$T_{v5}, c$	$k_u$	$T_{u1}$	$T_{u2}$	$T_{u3}$	$T_{o.c1}$	$T_{o.c2}$
340	2,53	0,15	1,751	0,0054	3,0	170	0,01	0,001	0,005	0,037	0,31

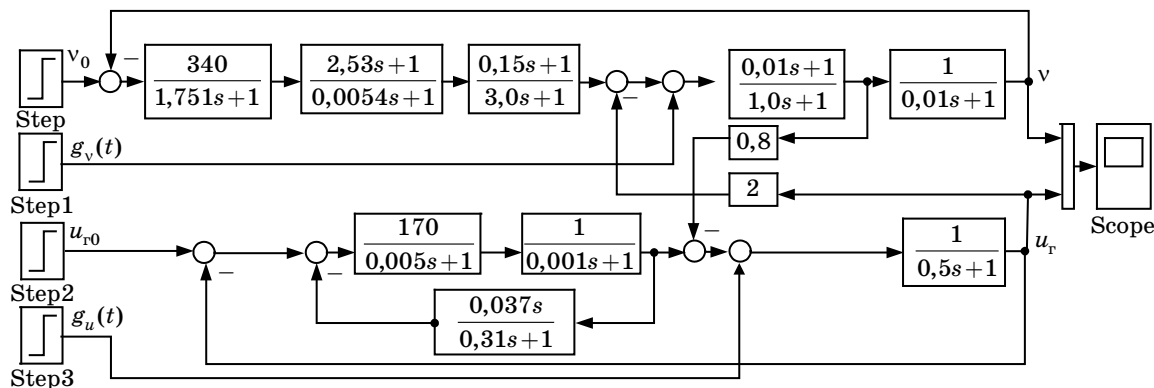


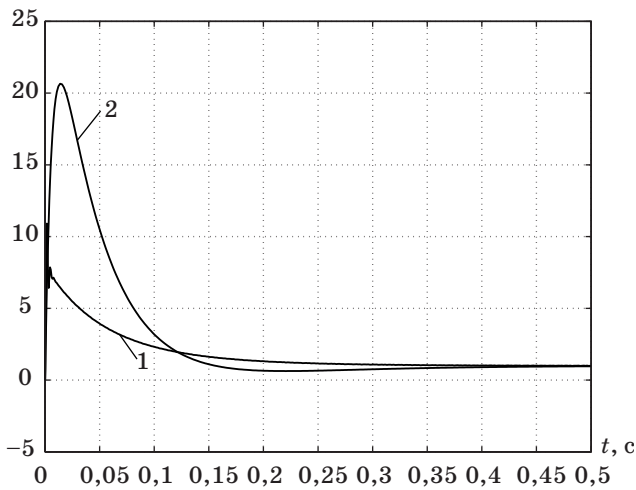
Рис. 2. Структурная схема вычислительной модели ЭЭУ в Matlab Simulink

при нормальном режиме работы (рис. 3), из которого следует, что максимальное отклонение сигнала на входе приводного двигателя составляет 21 относительную единицу (о. е.), а на входе генератора — 11 о. е.

Поэтому при моделировании аномальных режимов работы ЭЭУ амплитуда внешних возмущающих воздействий по частоте и напряжению должна изменяться в диапазоне 0,1÷10 о. е. (значение амплитуды возмущающего воздействия 0,1 о. е. соответствует 5 %-му отклонению частоты и 10 %-му отклонению напряжения от заданных значений). Такой, достаточно широкий, диа-

пазон изменения амплитуды возмущающих воздействий целесообразно применять для исследования аномальных режимов работы, поскольку параметры регуляторов ЭЭУ в ходе решения задачи синтеза определялись из условия приближенного обеспечения заданных показателей качества работы многоканальной системы автоматического управления (МСАУ) в переходном режиме при нормальной работе, т. е. при отсутствии возмущений в каналах регулирования.

**Моделирование аномальных режимов работы ЭЭУ с синтезированными параметрами.** Поскольку возмущающие воздействия могут дей-



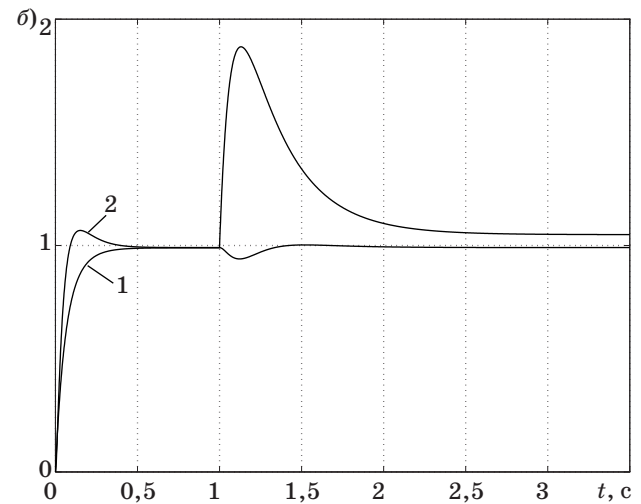
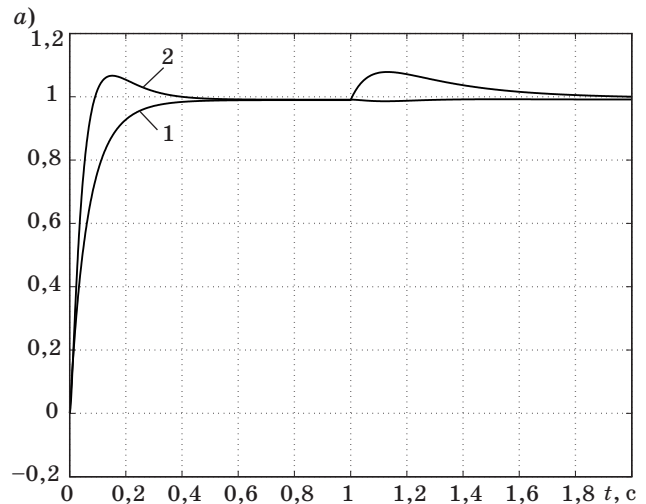
■ Рис. 3. Изменение сигналов на входах генератора (1) и приводного двигателя (2) ЭЭУ

ствовать как по отдельности, так и одновременно, то это обстоятельство учитывалось при исследованиях динамических свойств ЭЭУ в аномальных режимах. Внешние возмущающие воздействия подавались на входы генератора и приводного двигателя через 0,5 с после окончания переходных процессов по управляемым координатам системы регулирования частоты и напряжения (через 1 с после подачи на входы МСАУ управляющих воздействий). Время переходных процессов по напряжению и частоте определялось, как интервал времени, в течение которого сигналы  $u_r(t)$  и  $v(t)$  отклонялись от установившихся значений более чем на 5 и 2 % соответственно.

**Анализ динамических свойств ЭЭУ при внешнем возмущающем воздействии на входе синхронного генератора.** Динамические свойства МСАУ исследовались при подаче на вход синхронного генератора возмущающего воздействия  $g_u(t) = H_u 1(t)$  (соответствует увеличению напряжения с выхода возбудителя) амплитудой  $H_u = 1$  (рис. 4, а), 2, 5, 10 (рис. 4, б) о. е.

Показатели качества работы ЭЭУ при возмущающем воздействии  $g_u(t)$  представлены в табл. 2. Анализ динамических свойств МСАУ в данном аномальном режиме работы показывает, что увеличение амплитуды  $H_u$  приводит к росту статической ошибки сигнала  $u_r(t)$ , которая, однако, не превышает 0,05 от установившегося значения даже при  $H_u = 10$ .

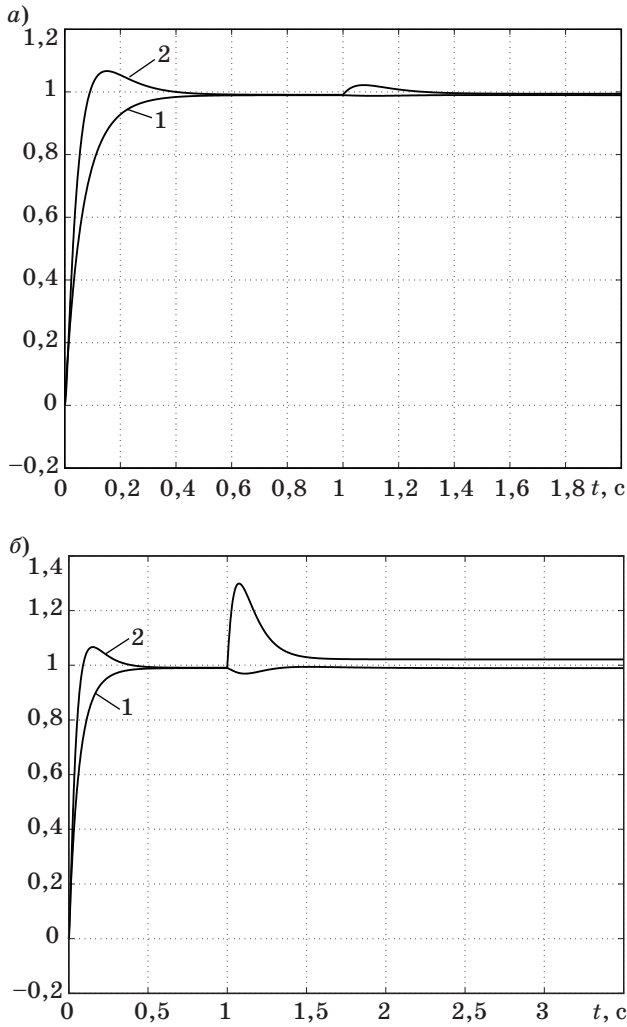
**Анализ динамических свойств ЭЭУ при внешнем возмущающем воздействии на входе приводного двигателя.** Динамические свойства МСАУ исследовались при подаче возмущающего воздействия  $g_v(t) = H_v 1(t)$  (соответствует увеличению напряжения с выхода регулятора скорости вращения) амплитудой  $H_v = 1$  (рис. 5, а), 2, 5, 10 (рис. 5, б) о. е. на приводной двигатель.



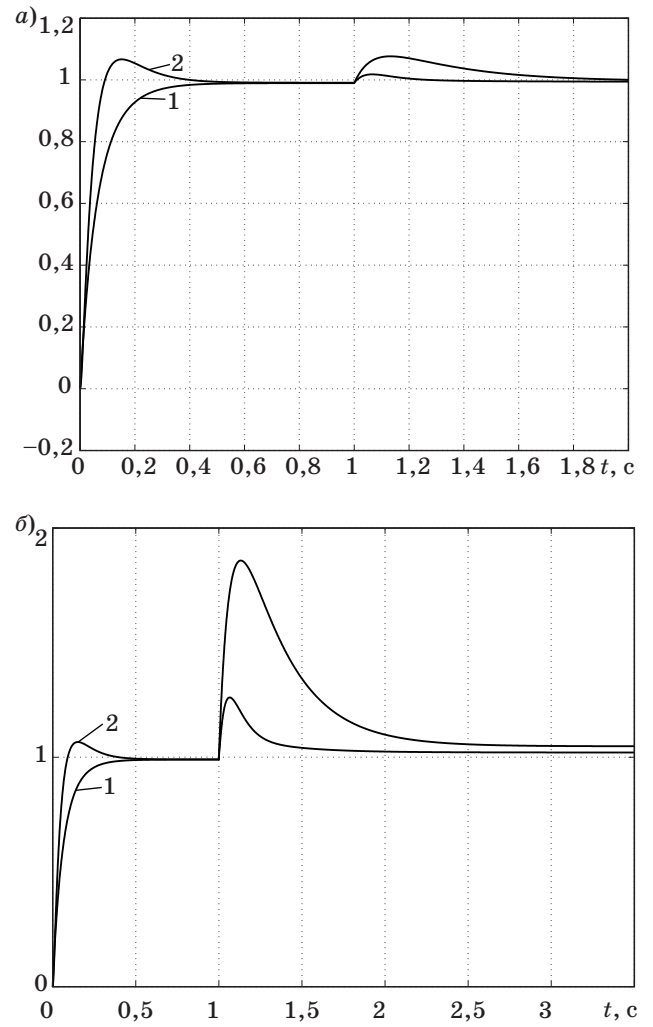
■ Рис. 4. Процессы на выходах МСАУ: а — при  $H_u = 1$ ; б — при  $H_u = 10$ : 1 — генератор; 2 — приводной двигатель

■ Таблица 2. Показатели качества работы ЭЭУ при возмущающем воздействии  $g_u(t)$

Амплитуда $H_u$ возмущающего воздействия $g_u(t)$	Показатель качества					
	Максимальное отклонение от установившегося значения		Время переходного процесса, с		Статическая ошибка	
	$v(t)$	$u_r(t)$	$v(t)$	$u_r(t)$	$v(t)$	$u_r(t)$
1	0,02	0,08	–	0,32	–	–
2	0,02	0,165	–	0,55	–	0,02
5	0,035	0,43	0,2	1,2	–	0,02
10	0,055	0,90	0,25	2,5	–	0,05



■ Рис. 5. Процессы на выходах МСАУ: а — при  $H_v = 1$ ; б — при  $H_v = 10$ : 1 — генератор; 2 — приводной двигатель



■ Рис. 6. Процессы на выходах МСАУ: а — при  $H_v = H_u = 1$ ; б — при  $H_v = H_u = 10$ : 1 — генератор; 2 — приводной двигатель

■ Таблица 3. Показатели качества работы ЭЭУ при возмущающем воздействии  $g_v(t)$

Амплитуда $H_v$ возмущающего воздействия $g_v(t)$	Показатель качества					
	Максимальное отклонение от установившегося значения		Время переходного процесса, с		Статическая ошибка	
	$v(t)$	$u_r(t)$	$v(t)$	$u_r(t)$	$v(t)$	$u_r(t)$
1	0,021	0,015	0,05	—	—	—
2	0,052	0,015	0,2	—	—	—
5	0,15	0,022	0,38	—	—	—
10	0,3	0,031	0,7	—	0,021	—

■ Таблица 4. Показатели качества работы ЭЭУ при возмущающих воздействиях  $g_v(t), g_u(t)$

Амплитуды возмущающих воздействий $g_v, g_u$	Показатель качества					
	Максимальное отклонение от установившегося значения		Время переходного процесса, с		Статическая ошибка	
	$v(t)$	$u_r(t)$	$v(t)$	$u_r(t)$	$v(t)$	$u_r(t)$
$H_v = H_u = 1$	0,018	0,07	—	0,25	—	—
$H_v = H_u = 2$	0,045	0,17	—	0,55	—	—
$H_v = H_u = 5$	0,13	0,43	0,25	1,0	0,0006	0,019
$H_v = H_u = 10$	0,27	0,88	0,4	1,4	0,0201	0,047

Показатели качества работы ЭЭУ при возмущающем воздействии  $g_v(t)$  представлены в табл. 3. Анализ динамических свойств МСАУ в данном аномальном режиме работы показывает, что увеличение амплитуды  $H_v$  приводит к возникновению незначительной статической ошибки по частоте (0,021 от заданного значения при  $H_v = 10$ ). Вместе с тем статическая ошибка в сигнале  $u_r(t)$  отсутствует, т. е. регуляторы обеспечивают стабильность частоты и напряжения при возмущающем воздействии на входе приводного двигателя. Поскольку отклонение сигнала  $u_r(t)$  от установившегося значения при регулировании не превышает 5 %, то полагаем, что время переходного процесса равно нулю.

**Анализ динамических свойств ЭЭУ при одновременном действии возмущений на входах синхронного генератора и приводного двигателя.** Наиболее сложным случаем для работы регуляторов ЭЭУ является одновременное действие возмущений по входам приводного двигателя и генератора, т. е.  $g_v(t) = H_v 1(t)$ ,  $g_u(t) = H_u 1(t)$ . Исследования проводились при нескольких значениях амплитуд внешних возмущающих воздействий  $H_u = H_v = 1$  (рис. 6, а), 2, 5, 10 (рис. 6, б) о. е.

Показатели качества работы ЭЭУ при одновременных возмущающих воздействиях  $g_v(t)$ ,  $g_u(t)$  представлены в табл. 4. Анализ динамических свойств МСАУ в данном аномальном режиме работы показывает, что увеличение амплитуды возмущений приводит к возникновению статической ошибки по частоте и напряжению (0,02 и 0,047 от заданного значения соответственно)

при  $H_v = H_u = 10$ . При меньших величинах возмущений статические ошибки в каналах регулирования отсутствуют, т. е. регуляторы обеспечивают стабильность частоты и напряжения при одновременных возмущающих воздействиях на входах приводного двигателя и генератора. Длительность переходных процессов определялась, как интервал времени, в течение которого отклонение сигнала  $u_r(t)$  в процессе регулирования превышало 5 %, а сигнала  $v(t)$  — 2 % от установившегося значения.

### Заключение

Проведены исследования математической модели ЭЭУ в аномальных режимах работы, при наличии внешних возмущающих воздействий различной амплитуды в каналах регулирования частоты и напряжения, которые показали высокую степень устойчивости МСАУ с синтезированными параметрами к внешним возмущающим воздействиям. При этом показатели качества регулирования по напряжению и частоте соответствуют ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1).

Результаты, представленные в данной статье, получены при выполнении проекта «Исследование установившихся и переходных режимов автономной электроэнергетической установки со сверхпроводниковым оборудованием и системой криогенного обеспечения», выполняемого по заданию Рособразованию по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)» (код ГРНТИ РНП.2.1.2.9319).

### Литература

1. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В., Цветков С. А. Синтез и моделирование автономной электроэнергетической установки // Информационно-управляющие системы. 2008. № 4. С. 14–17.
2. Никитин А. В., Шишляков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / Под ред. В. Ф. Шишлякова; ГУАП. СПб., 2003. 358 с.
3. Шишляков В. Ф., Цветков С. А., Шишляков Д. В. Синтез параметров непрерывных и импульсных многосвязных систем автоматического управле-

- ния: Монография / Под ред. В. Ф. Шишлякова. СПб.: ГУАП, 2009. 180 с.
4. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 51–62.
5. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // Известия вузов. Сер. Проблемы энергетики. 2006. № 12. С. 49–54.