

МЕТОД РАСШИРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ¹

Гулюкина С. И.²

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Рассматривается задача синтеза системы автоматического регулирования возбуждением (САРВ) по каналу стабилизации угловой частоты вращения ротора синхронного генератора. К особенностям САРВ следует отнести ограничения минимального и максимального возбуждения, скорость изменения возбуждения, форсировку возбуждения, демпфирование качаний и стабилизацию собственного и группового движения. Для решения поставленной задачи используется метод расширения пространства состояний за счет введения в цепь обратной связи фильтров первого порядка. При воздействии на систему внешних возмущений использование глубоких обратных связей на основе линейных функций с насыщением позволяет, с одной стороны, решить задачу слежения по выходным переменным с заданной точностью, а с другой стороны, обеспечить ограничения на фазовые переменные и управления. Для получения оценок неизвестных компонент вектора состояния системы и действующих на систему несогласованных внешних возмущений строится наблюдатель на скользящих режимах. Результаты численного моделирования в Matlab подтверждают высокую эффективность предложенного подхода к управлению синхронным генератором.

Ключевые слова: синхронный генератор, задача слежения, метод расширения пространства, ограничения на фазовые переменные и управление.

1. Введение

Задачи управления синхронными генераторами (СГ) представляются практически значимыми, и с момента появления СГ их решению в теории управления посвящено множество работ [11–13, 15–17, 20]. Интерес к этой проблематике не ослабевает и в настоящее время, что обуславливается возрастающими воз-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-01-00363А).

² Светлана Игоревна Гулюкина, м.н.с. (gulyukina.s.i@mail.ru).

возможностями микропроцессорной реализации все более сложных и, следовательно, более качественных алгоритмов управления.

Среди множества известных результатов следует выделить работу [1], в которой излагаются качественно новый (синергетический) подход в общей теории управления, в частности, по управлению турбогенераторами с использованием укороченной модели СГ. В работе [11] предложен синтез алгоритмов управления СГ на скользящих режимах на основе полной модели СГ. Отметим, что известные алгоритмы громоздки и достаточно сложны в реализации, что в значительной степени ограничивает их практическое использование, либо применимы только в некоторых частных случаях. Так, например, линеаризация применима только в окрестности состояния равновесия, применение линейных методов управления может оказаться неэффективным при изменении состояния и, возможно, может отрицательно влиять на устойчивость системы [9, 10]. Логическим решением этой проблемы является использование методов нелинейного управления, которые остаются применимыми для любых рабочих условий, а не только для условий, близких к положениям равновесия.

В данной работе рассматривается задача обеспечения инвариантности выходной переменной синхронного генератора – частоты вращения ротора синхронного генератора по отношению к внешним несогласованным возмущениям с учетом ограничений на управление и фазовые переменные. Возмущения полагаются неизвестными, ограниченными по модулю функциями. Рассматриваемая модель является нелинейной.

Методы для нелинейных энергосистем, предлагаемые в литературе, можно разделить на две категории: методы, основанные на использовании нормальных форм [14, 16, 17, 21], и методы, основанные на функциях Ляпунова [8, 13, 19].

В основе предложенного в данной работе подхода лежит использование метода расширения пространства состояний (МРПС) за счет введения динамических фильтров первого порядка. В работе [2] предложено решение задачи слежения в условиях неопределенности и с учетом ограничений на фазо-

вые переменные и управления с использованием теории скользящих режимов.

В данной работе используются методы систем с глубокими обратными связями с использованием линейных функций с насыщением (sat-функций), что позволяет обеспечить заданные ограничения на компоненты вектора состояния и управляющие воздействия [2,3].

В разделе 2 описывается объект управления. В разделе 3 вводится модель объекта управления и дается постановка задачи. В разделе 4 разрабатывается метод расширения пространства состояний за счет введения интегральных звеньев для управления контуром возбуждения в синхронном генераторе (СГ). В разделе 5 строится наблюдатель вектора состояний и возмущений. В разделе 6 приводятся результаты моделирования в Matlab-Simulink.

2. Объект управления

Синхронный генератор (СГ) является основным устройством, используемым для выработки электроэнергии.

Как известно [18], выработка активной мощности обеспечивается синхронной частотой вращения ротора с помощью приводного двигателя (ПД), в то время как выработка реактивной мощности определяется током обмотки возбуждения [12]. В современных модификациях систем возбуждения СГ используются тиристорные преобразователи для управления током обмотки возбуждения [12]. Системы автоматического регулирования возбуждением (САРВ) выполняют две основные функции: во-первых, обеспечивают заданное напряжение на выходе СГ и, во-вторых, обеспечивают демпфирование качаний ротора и стабилизацию собственного и группового движения.

При установившемся токе возбуждения ЭДС СГ и напряжение сети уравнивается [4, 5]. При увеличении тока возбуждения реакция якоря размагничивающая, по отношению к сети СГ является емкостью и выдает в сеть реактивную мощность. При уменьшении тока возбуждения реакция якоря подмагничивающая, по отношению к сети СГ является индуктивно-

стью и потребляет из сети реактивную мощность. Практика показывает, что уровень частоты связан с балансом активной мощности, а уровень напряжения сети (на нагрузке) – с балансом реактивной мощности.

Поскольку канал управления по ОВ является более быстродействующим, чем канал управления частотой вращения турбины, помимо отклонения ЭДС СГ и амплитуды напряжения можно ввести в качестве цели управления также и поддержание синхронной частоты вращения. Именно задача поддержания синхронной частоты посредством САРВ является целью данной работы.

3. Математическая модель. Постановка задачи

В качестве математической модели СГ при работе на энергосеть неограниченной мощности без учета динамики демпферных обмоток примем систему уравнений вида (1) [1, 4, 6,11], описывающую переходные процессы в СГ. Первое уравнение системы (1) характеризует изменение угла нагрузки, т.е. угла между вектором ЭДС СГ и вектором напряжения генератора. Второе уравнение представляет собой уравнение баланса мощностей, последнее уравнение описывает динамику отклонения ЭДС СГ, в качестве управляющего воздействия принимается отклонение напряжения возбуждения СГ:

$$\dot{\delta}(t) = s;$$

$$(1) \quad \dot{s}(t) = u_0 - b_1 \sin \delta - (b_2 + b_3 \sin \delta)e - ce^2 - m_L(s, t);$$

$$\dot{e}(t) = -ke + b_4 s \sin \delta + ku_1,$$

Описание параметров модели (1) приведено в таблице 1.

Таблица 1. Параметры модели СГ и их значения

Параметр	Значение
δ	Изменение угла нагрузки, рад
$s = (\omega_0 - \omega_r) / \omega_0$	Скольжение ротора, о.е.
ω_0	Синхронная скорость, рад/с
ω_r	Угловая частота вращения ротора, рад/с

Таблица 1 (продолжение)

e	Напряжение возбудителя поля, о.е.
u_0	Стабилизирующее управление, пропорциональное механической мощности (частоте вращения) турбины
u_1	Отклонение напряжения возбуждения СГ, В
$m_L(s, t)$	Внешнее возмущение, отражающее влияние нагрузки
b_i, k	Конструктивные параметры модели ОУ

Ставится задача поддержания частоты вращения ротора СГ на уровне синхронной частоты с заданной точностью

$$(2) \quad |s| \leq \Delta_0 = \text{const} > 0.$$

Сделаем следующие предположения относительно системы (1):

1) для измерения доступны $\delta(0), s, e, u_0$;

2) параметры объекта управления полагаются известными положительными константами $b_i, k, c = \text{const} > 0, i = 1, \dots, 4$.

3) на переменные системы наложены ограничения:

$$(3) \quad e \in [0, E], |u_1| < U, E, U = \text{const} > 0.$$

Для удобства дальнейших рассуждений введем замену переменных вида

$$(4) \quad x_1 = \delta, x_2 = s, x_3 = -[b_2 + b_3 \sin(x_1)]e - ce^2.$$

С учетом (4) система (1) примет вид

$$(5) \quad \dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3 + f_2 + \eta_2, \dot{x}_3 = bu_1 + f_3,$$

где $f_2 = u_0 + b_1 \sin(x_1), \eta_2 = -m_L(x_2, t), d = -(b_2 + b_3 \sin(x_1) + 2ce), f_3 = d(-ke + b_4 x_2 \sin(x_1)) - b_3 \cos(x_1) x_2 e, b = kd, b \neq 0$.

Далее будем полагать ограниченными функциями $|f_2| \leq F_2, |f_3| \leq F_3, |\eta_2| \leq N_2, F_2, F_3, N_2 = \text{const}$.

В системе (5) выполняются ограничения вида

$$(6) \quad |x_3| < X_3, |u_1| < U, X_3, U = \text{const} > 0.$$

Ставится задача синтеза динамической обратной связи, обеспечивающей инвариантность выходной переменной по отношению к внешним возмущениям с заданной точностью

$$(7) \quad |x_2(t)| \leq \Delta_0 = \text{const}, \forall t > T_0 > 0$$

с учетом ограничений (6).

4. Синтез обратной связи в рамках МРПС

Представим решение поставленной задачи в рамках метода расширения пространства состояний в условиях полной информации о компонентах вектора состояния и возмущениях.

Для дальнейшего изложения сформулируем следующий результат [3].

Лемма. Рассмотрим систему $\dot{x} = u + \eta(x, t)$, $x, \eta \in R$, где $x(t)$, $u(t)$, $\eta(x, t)$ – переменная состояния, управление и возмущение соответственно, $|\eta| \leq N = \text{const}$, $|\dot{\eta}| \leq \bar{N} = \text{const} \quad \forall t > T$.

Тогда существует такое управление $u = -M \text{sat}(s)$, $s = kx$, $M = \text{const} > 0$, $k = \text{const} > 0$, что для любых заданных Δ , $\bar{\Delta}$, $k = \text{const}$ за конечное время выполняются соотношения:

- 1) Условие попадания в линейную зону: $M > N$.
- 2) $|x(t)| \leq \Delta = \text{const}$,
- 3) $|\dot{x}(t)| \leq \bar{\Delta} = \text{const}$,
- 4) $|kx(t) - \eta(x, t)| \leq \bar{\Delta}_0$.

Доказательство. Время попадания в заданную область Δ состоит из двух слагаемых – времени попадания в линейную зону (t_1) и времени попадания из линейной зоны в заданную область Δ (t_0), т.е. $T = t_1 + t_0$.

1. Вне линейной зоны ($|s(0)| > M$) дифференциальное уравнение примет вид $\dot{s}/k = -M \text{sign}(s) + \eta(\cdot)$. Пусть $M = N + \Delta M$, $\Delta M = \text{const}$. Условия попадания в линейную зону определяются выбором функции Ляпунова в виде квадратичной формы $V = 0,5s^2$.

Производная функции Ляпунова имеет вид $\dot{V} = s\dot{s} = sk(-M \text{sign}(s) + \eta(t)) \leq -|ks|(M - N) = -|ks|\Delta M < 0$.

Для получения оценки времени попадания переменной s в линейную зону $|s| \leq M$ заметим, что полученная оценка производной функции Ляпунова мажорируется решением дифференциального уравнения вида $\dot{V} = -k|s|\Delta M = -k\Delta M \sqrt{2V}$, которое решается в явном виде: $V(t) = (-0,5\sqrt{2k\Delta M}t + V^{1/2}(0))^2$ с началь-

ным значением $V(0) = 0,5s^2(0)$ и конечным значением $V(t_1) = 0,5M^2$. Получаем оценку времени попадания в линейную зону: $V(t) = 0,5M^2 \Rightarrow t_1 = \frac{\sqrt{2V}^{1/2}(0) - M}{k\Delta M} = \frac{|s(0)| - M}{k\Delta M}$.

После попадания в линейную зону уравнение примет вид $\dot{x} = -kx + \eta(x, t)$, причем при $t = t_1$ $x(0) = M$.

2. Сходимость переменной состояния системы x в заданную окрестность нуля $|x(t)| \leq \Delta$ решается путем выбора кандидата функции Ляпунова в виде $V = 0,5x^2$.

Тогда условие $\dot{V} = x\dot{x} = x(-kx + \eta(x, t)) \leq |x|(-k|x| + N) < 0 \Rightarrow -k|x| + N < 0$ выполняется вне области $|x| \leq N/k = \Delta$, следовательно, за некоторое конечное время t_0 выполняется соотношение $|x| \leq \Delta$.

3. Получим оценку времени попадания в заданную окрестность нуля, построим следующую конструкцию. Дадим положительное приращение коэффициенту усиления $k_0 = k + \Delta k$, $\Delta k > 0$. Из того факта, что $\Delta = N/k > \Delta_0 = N/k_0$ и обозначив $\Delta_1 = \Delta - \Delta_0$, следует, что обеспечив неравенство $|x| < \Delta_0 + \Delta_1$ автоматически обеспечивается заданная точность $|x| < \Delta$. Из оценки решения системы

$$x(t) = |x(0)e^{-k_0 t}| + \left| \int_0^t e^{-k_0(t-\tau)} \eta(\tau) d\tau \right| \leq |x(0)|e^{-k_0 t} + N(1 - e^{-k_0 t}) / k_0$$

получаем оценку времени сходимости в область $|x| \leq \Delta$, где t_0 определяется так: $(M - \Delta_0)e^{-k_0 t} \leq \Delta_1 \Rightarrow t_0 \geq \frac{1}{k_0} \ln \left(\frac{M - \Delta_0}{\Delta_1} \right)$.

Следовательно, время попадания в заданную окрестность нуля исходной системы $T \geq \frac{|kx(0)| - M}{k\Delta M} + \frac{1}{k_0} \ln \left(\frac{M - \Delta_0}{\Delta_1} \right)$.

4. Для производной переменной x : $\ddot{x} = -k\dot{x} + \dot{\eta}(x, t)$, $x, \eta \in R$, получаемой в результате дифференцирования обеих частей уравнения, справедливы аналогичные рассуждения. Пусть задана окрестность $|\dot{x}| \leq \bar{\Delta} = \bar{N} / k$. Выберем параметр из неравенства

$\bar{k}_0 > k$ и обозначим $\bar{\Delta} = \bar{N}/k > \bar{\Delta}_0 = \bar{N}/k_0$. Тогда за конечное время выполняется соотношение $|\dot{x}| \leq \bar{\Delta}_0, t \geq \bar{t}_0$, где $\bar{t}_0 = \frac{1}{\Delta_0} \ln \left(\frac{|\dot{x}(0)| - \bar{\Delta}}{\Delta_0 - \bar{\Delta}} \right), |\dot{x}(0)| > \bar{\Delta}_0$.

5. Наконец, с учетом попадания системы в линейную зону справедлива оценка вида $|kx(t) - \eta(x, t)| \leq \bar{\Delta}_0, \forall t \geq \bar{t}_0$. Следовательно, можно получить оценку возмущения с заданной точностью: $kx(t) = \eta(t) + \delta(t), \delta(t) \leq \bar{\Delta}_0, \forall t \geq \bar{t}_0$. Отметим, что для случая постоянных возмущений решение системы $\ddot{x} = -k\dot{x} + \dot{\eta}, \dot{\eta} = 0$ имеет решение вида $\ddot{x} = \dot{x}(0)e^{-kt}$ и, следовательно, имеем асимптотически сходящуюся оценку возмущения $kx \rightarrow \eta, t \rightarrow \infty$.

Выбор значения параметра k из условия $k \geq \max\{N/\Delta_0, \bar{N}/\bar{\Delta}_0\}$ гарантирует выполнение условий леммы, сходимость переменной $x(t)$ и её производной $\dot{x}(t)$ в заданные области 1) $|x(t)| \leq \Delta_0$, 2) $|\dot{x}(t)| \leq \bar{\Delta}_0$, 3) $|kx(t) - \eta(x, t)| \leq \bar{\Delta}_0 \quad \forall t \geq \max\{t_0, \bar{t}_0\}$. Лемма доказана.

Для решения поставленной задачи стабилизации переменной x_2 с заданной точностью (7) разрабатывается приведенная ниже процедура.

Дополним систему (5) подсистемой фильтров с устойчивыми собственными движениями [7]:

$$(8) \quad \dot{z}_2 = -a_2 z_2 + v_2 + f_2 + \eta_2, \dot{z}_3 = -a_3 z_3 + v_3 + f_3, \quad z_i(0) = 0, \quad i = 2, 3,$$

где входные воздействия фильтров выбираются далее.

В предположении $v_i \leq M_i = \text{const}, i = 2, 3$, относительно переменных фильтров (8) справедливы следующие оценки:

$$(9) \quad |a_2 z_2| < M_2 + F_2 + N_2, \quad |\dot{z}_2| < 2(M_2 + F_2 + N_2), \\ |a_3 z_3| < F_3, \quad |\dot{z}_3| < 2F_3$$

для $\forall t > 0$.

Эти оценки следуют непосредственно из решения системы (8):

$$z_2(t) = e^{-a_2 t} \left[z_2(0) + \int_0^t e^{a_2 \tau} (v_2(\tau) + f_2 + \eta_2(x, t)) d\tau \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow |z_2(t)| \leq \left| (z_2(0) - \frac{M_2 + F_2 + N_2}{a_2}) e^{-a_2 t} + \frac{M_2 + F_2 + N_2}{a_2} \right| < \frac{M_2 + F_2 + N_2}{a_2}$$

в силу $-\frac{2(M_2 + F_2 + N_2)}{a_{2i}} < z_2(0) - \frac{M_2 + F_2 + N_2}{a_2} < 0$.

Аналогичные рассуждения справедливы для компоненты z_3 .

Введем динамическую замену переменных с учетом (5), (8):

$$(10) \quad \tilde{x}_1 = x_1, \quad \tilde{x}_2 = x_2 - z_2, \quad \tilde{x}_3 = x_3 - z_3 + a_2 z_2$$

и запишем систему (2) с выбранной обратной связью

$$(11) \quad bu_1 = -a_3 z_3$$

относительно новых переменных (10):

$$(12) \quad \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 + z_2, \quad \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_3 + z_3 - v_2, \quad \dot{\tilde{x}}_3 = a_2 \dot{z}_2 - v_3.$$

Положим корректирующее воздействие непрерывными функциями с насыщением

$$(13) \quad v_i = M_i \text{sat}(s_i), \quad s_i = g_i \tilde{x}_i, \quad i = 2, 3, \quad g_i = \text{const} > 0.$$

Здесь по определению $M_i \text{sat}(s_i) = \min(M_i, |s_i|) \text{sign}(s_i)$ [3].

Таким образом, для решения поставленной задачи (7) с учетом ограничений (6) необходимо выбрать коэффициенты усиления g_i , $i = 2, 3$, в (13), параметры фильтров a_i , $i = 2, 3$, и амплитуды функций с насыщением M_i , $i = 2, 3$. Предлагается трехэтапная процедура выбора перечисленных параметров.

Этап 1. Выбор коэффициентов усиления. Первый этап состоит в выборе коэффициентов усиления при функционировании уравнений системы (12) в линейной зоне.

В линейной зоне по всем sat-функциям уравнения (12) описывается уравнениями вида

$$(14) \quad \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 + z_2, \quad \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_3 + z_3 - g_2 \tilde{x}_2, \quad \dot{\tilde{x}}_3 = a_2 \dot{z}_2 - g_3 \tilde{x}_3.$$

Согласно лемме с учетом оценок (9) применительно к системе (14) имеем оценки

$$(15) \quad \begin{aligned} |\tilde{x}_2| &\leq \frac{1}{g_2} (|\tilde{x}_3| + \frac{M_3 + F_3}{a_3}) = \Delta_2, \\ |\tilde{x}_3| &\leq \frac{1}{g_3} (2a_2(M_2 + F_2 + N_2)) = \Delta_3, \end{aligned}$$

где $\Delta_i, \bar{\Delta}_i = \text{const} > 0, i = 2, 3$, – произвольно заданные константы. Действительно, при фиксированных $M_i, a_i = \text{const}$ выбором коэффициентов $g_i > 0, i = 1, 3$, можно обеспечить заданную точность стабилизации переменных $|\tilde{x}_i| \leq \Delta_i, |\dot{\tilde{x}}_i| \leq \bar{\Delta}_i, i = 2, 3$, поскольку в асимптотике выполняются соотношения $g_i \rightarrow \infty \Rightarrow \Delta_i \rightarrow 0, \bar{\Delta}_i \rightarrow 0, i = 2, 3$.

В соответствии с (15), (10) и (9) с учетом ограничений (6) для исходных переменных вектора состояния справедливы оценки

$$(16) \quad \begin{aligned} \tilde{x}_2 = x_2 - z_2 \leq \Delta_2 &\Rightarrow |x_2| \leq \frac{M_2 + F_2 + N_2}{a_2} + \Delta_2 \leq \Delta_0, \\ \tilde{x}_3 = x_3 - z_3 + a_2 z_2 \leq \Delta_3 &\Rightarrow |x_3| \leq \frac{F_3}{a_3} + (M_2 + F_2 + N_2) + \Delta_3 \leq X_3, \\ |bu_1| \leq M_3 + F_3 &\Rightarrow |u_1| \leq \frac{M_3 + F_3}{\min|b|} \leq U. \end{aligned}$$

Следовательно, задавая желаемые $\Delta_i = \text{const} > 0$ (при условии $\Delta_2 < \Delta_0$) при заданных постоянных времени фильтров $a_i = \text{const}$ и амплитуд функций с насыщением $M_i, i = 2, 3$, удастся выбрать коэффициенты усиления g_i так, что будет выполняться система (15).

Этап 2. Выбор амплитуд функций с насыщением. Выберем амплитуды sat-функций для того, чтобы обеспечить попадание вектора состояния системы (12) в линейную зону по всем sat-функциям $|s_i| < M_i \Rightarrow M_i \text{sat}(s_i) = s_i \Rightarrow |\tilde{x}_i| \leq \frac{M_i}{g_i}$.

Согласно лемме для обеспечения попадания в линейную зону по всем фиктивным управлениям выбор амплитуд фиктив-

ных управлений фильтров осуществляется выбором кандидата функций Ляпунова в виде $\tilde{x}_i \dot{\tilde{x}}_i < 0, i = 1, 2$ при $|\tilde{x}_i| > \frac{M_i}{g_i}$.

Шаг 1. Рассмотрим вторую подсистему (12) в предположении, что в третьей подсистеме выполнено соотношение $|\tilde{x}_3| \leq \Delta_3$, т.е. третья подсистема функционирует в линейной зоне.

Согласно лемме амплитуду M_2 определяет неравенство $M_2 > |z_3 + \Delta_3| \Rightarrow M_2 > \frac{M_3 + F_3}{a_3} + \Delta_3$.

Шаг 2. Рассмотрим третью подсистему (12), по аналогии с первым шагом $M_3 > |a_2 \dot{z}_2| \Rightarrow M_3 > 2a_2(M_2 + F_2 + N_2)$.

Таким образом, имеем неравенства, определяющие амплитуды функций с насыщением:

$$(17) \quad M_2 > \frac{M_3 + F_3}{a_3} + \Delta_3, \quad M_3 > 2a_2(M_2 + F_2 + N_2).$$

При этом, согласно лемме, следует, что увеличение запаса в неравенствах (17) сокращает время попадания в линейную зону по всем sat-функциям.

Этап 3. Выбор постоянных времени фильтров. Выберем временные параметры фильтров при движении переменных системы (12) в линейной зоне по всем sat-функциям.

При функционировании в линейной зоне с учетом (15) справедливы оценки $|v_i| = |g_i \tilde{x}_i| \leq g_i \Delta_i, i = 2, 3$, и после подстановки этих оценок в уравнения фильтров (8) получим условия на выбор постоянных времени фильтров:

$$(18) \quad \begin{aligned} \tilde{x}_2 = x_2 - z_2 \leq \Delta_2 &\Rightarrow |x_2| \leq \frac{g_2 \Delta_2 + F_2 + N_2}{a_2} + \Delta_2 \leq \Delta_0, \\ \tilde{x}_3 = x_3 - z_3 + a_2 z_2 \leq \Delta_3 &\Rightarrow \\ |x_3| \leq \frac{g_3 \Delta_3 + F_3}{a_3} + a_2(g_2 \Delta_2 + F_2 + N_2) + \Delta_3 &\leq X_3, \\ |bu_1| = g_3 \Delta_3 + F_3 &\Rightarrow |u_1| \leq \frac{g_3 \Delta_3 + F_3}{\min|b|} \leq U. \end{aligned}$$

Решая систему неравенств (18), получим неравенства, определяющие выбор постоянных времени фильтров:

$$(19) \quad a_2 \geq \frac{g_2 \Delta_2 + F_2 + N_2}{(\Delta_0 - \Delta_2)},$$

$$a_3 \geq \frac{g_3 \Delta_3 + F_3}{X_3 - a_2(g_2 \Delta_2 + F_2 + N_2 + \Delta_3)}.$$

Сделаем несколько замечаний относительно системы неравенств (19):

1. Существенно, что выбор постоянных фильтров согласно (19) не зависит от выбора амплитуд фиктивных управлений фильтров.

2. Запас в обеспечении неравенств задает скорость сходимости замкнутой системы (12) в заданную окрестность (7).

Таким образом, последовательность синтеза фильтров (8) состоит из трех шагов. На первом шаге находятся постоянные времени фильтров из соотношений (19). На втором шаге определяются амплитуды разрывных воздействий фильтров согласно соотношениям (17). На третьем шаге выбираются коэффициенты усиления при функционировании уравнений системы (12) в линейной зоне.

5. Синтез наблюдателя

Для синтеза обратной связи согласно (13) требуется информация о компонентах вектора \tilde{x}_2, \tilde{x}_3 и о сигналах $f_2 + \eta_2, f_3$ для построения фильтров (8).

В предположении, что в системе (5) для измерения доступны переменные x_2, x_3 , построим наблюдатель вида:

$$(20) \quad \dot{w}_1 = w_2, \dot{w}_2 = w_3 + v_2, \dot{w}_3 = b w_1 + v_3,$$

где v_i – корректирующие воздействия наблюдателя, определяемые далее.

Запишем систему дифференциальных уравнений с учетом (5) и (20) в невязках $\varepsilon_1 = x_1 - w_1, \varepsilon_2 = x_2 - w_2, \varepsilon_3 = x_3 - w_3$:

$$(21) \quad \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2, \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_3 + f_2 + \eta_2 - v_2, \dot{\varepsilon}_3 = f_3 - v_3.$$

Шаг 1. Выберем корректирующее воздействие v_3 сле-

дующим образом: $v_3 = L_3 \text{sign}(\varepsilon_3)$, $L_3 = \text{const} > 0$.

После подстановки, первое уравнение системы (21) примет вид $\dot{\varepsilon}_3 = f_3 - L_3 \text{sign}(\varepsilon_3)$. Выбор амплитуды $L_3 > 0$, обеспечивающей скользящий режим по прямой $\varepsilon_3 = 0$, определяется на основе второго метода Ляпунова: $V = 0,5\varepsilon_3^2$. Производная функции Ляпунова имеет вид: $\dot{V} = \varepsilon_3 \dot{\varepsilon}_3 \leq |\varepsilon_3|(F_3 - L_3) < 0$, откуда следует неравенство на выбор L_3 , из условия $L_3 > F_3$ возникает скользящий режим по прямой $\varepsilon_3 = 0$, т.е. $x_3 = w_3$. Следовательно $\dot{\varepsilon}_3 = 0$, откуда получим среднее значение разрывного сигнала $v_{3eq} = f_3$.

Шаг 2. Выбором корректирующего воздействия во второй подсистеме (21) в виде $v_2 = L_2 \text{sign}(\varepsilon_2)$, $L_2 = \text{const} > 0$ и при выполнении условия $L_2 > |\varepsilon_3| + F_2 + N_2$ обеспечивается скользящий режим по прямой $\varepsilon_2 = 0$. Откуда следует равенство наблюдаемой и реальной компоненты $x_2 = w_2$, среднее значение разрывного сигнала имеет вид: $v_{2eq} = \varepsilon_3 + f_2 + \eta_2$.

Отметим, что соответствующие эквивалентные значения корректирующих воздействий наблюдателя можно получить на выходе низкочастотного фильтра первого порядка $\mu_i \dot{\tau}_i = -\tau_i + v_i, \mu_i > 0, i = \overline{1,4}, v_{ieq} = \tau_i$.

Таким образом, решена задача получения оценок компонент вектора состояния системы (5) $x_i = w_i, i = 2, 3$, а значит, и компонент вектора состояния системы (13).

Замечание. Переменная x_1 обычно не доступна для измерения. Для получения ее оценки используют следующий подход [3]. Предполагается, что в начальный момент система (2) функционирует в установившемся режиме и при этом известно значение переменной $x_1(0)$. Тогда, значение переменной $x_1(t)$ определяется выражением $x_1(t) = x_1(0) + \int_0^t x_2(\tau) d\tau$. В случае выполнения соотношения $\lim_{t \rightarrow \infty} x_2(t) = 0$ переменная $x_1(t)$ стремится к новому установившемуся значению $x_1(t) = x_{1s} = \text{const}$. Если в системе (20) положить начальные условия на переменную

$w_1(0) = x_1(0)$, то начальное значение первой координаты системы (21) будет равно нулю $\varepsilon_1(0) = 0$ и, следовательно, эта переменная будет сходиться к установившемуся значению $\varepsilon_1(t) = \int_0^t \varepsilon_2(\tau) d\tau = \varepsilon_{1s} = \text{const}$. Откуда восстанавливается новое установившееся значение переменной $x_{1s}(t) = \varepsilon_{1s}(t) + w_1(t)$.

6. Моделирование

Ниже представлены результаты моделирования системы управления возбуждением СГ.

Параметры модели: $u_0 = 10$; $b_1 = 2$; $b_2 = 10$; $b_3 = 0,8$; $b_4 = 3$; $c = 0,01$; $k = 10$.

Начальные условия: $\delta(0) = 10$; $s(0) = 20$; $e(0) = 20$.

Параметры регулятора и установки: $a_1 = 5000$; $a_2 = 1000$; $M_2 = 100$; $M_3 = 500$; $g_2 = 15$; $g_3 = 100$.

Параметры наблюдателя: $w_1(0) = \delta(0)$, $w_2(0) = 0$, $w_3(0) = 0$.

Заданная точность и ограничения: $\Delta_0 = 0,01$; $\Delta_2 = 0,005$; $\Delta_3 = 0,1$; $e \in [0; 30]$; $|u| \leq 400$.

На рис. 1–3 представлены графики компонент вектора состояния в зависимости от времени. На рис. 4 и рис. 5 представлены графики зависимости компонент фильтра от времени.

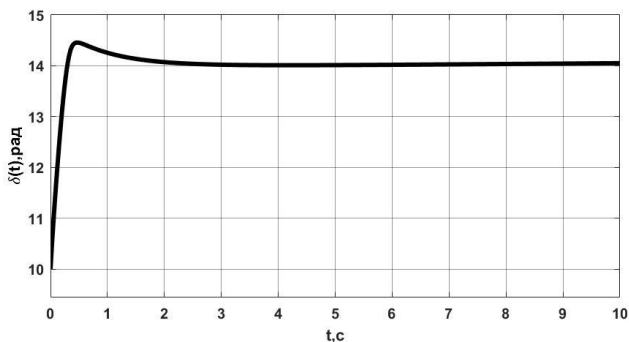


Рис. 1. График зависимости $\delta(t)$

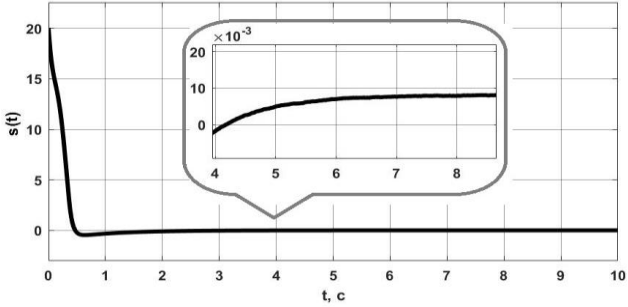


Рис. 2. График зависимости $s(t)$

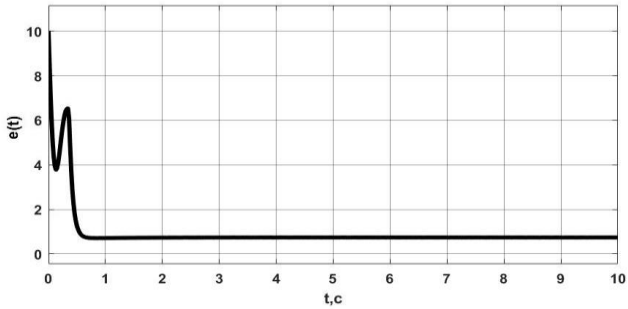


Рис. 3. График зависимости $e(t)$

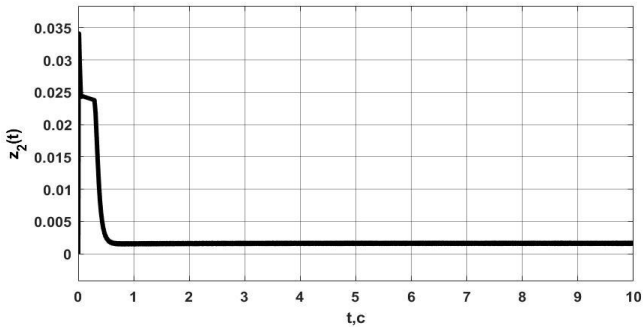


Рис. 4. График зависимости $z_2(t)$

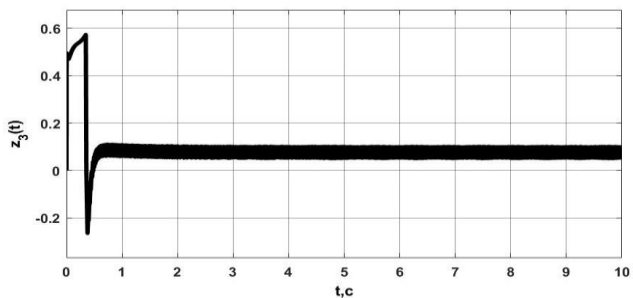


Рис. 5. График зависимости $z_3(t)$

На рис. 6–8 представлены графики ошибок наблюдения ε_2 , ε_3 и отклонение $x_{1s}(t)$ от $x_1(t)$.

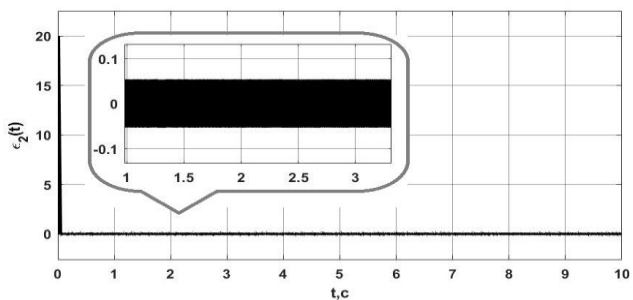


Рис. 6. График зависимости $\varepsilon_2(t)$

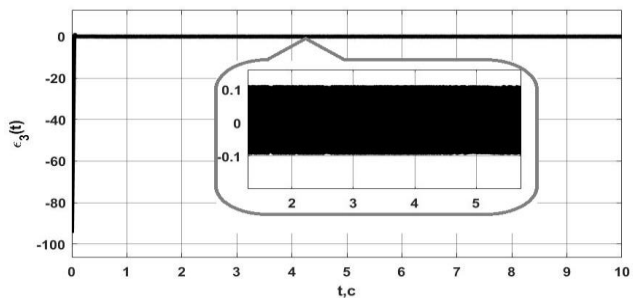


Рис. 7. График зависимости $\varepsilon_3(t)$

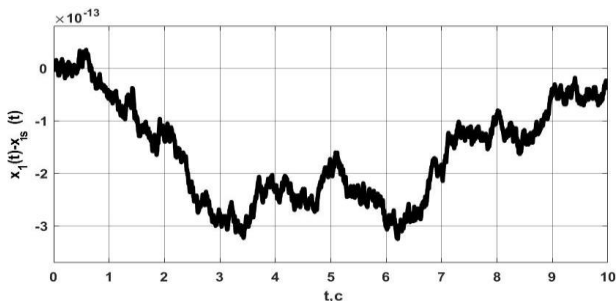


Рис. 8. График зависимости $x_1(t) - x_{1s}(t)$

7. Заключение

В данной работе предложен оригинальный метод синтеза управления для синхронного генератора с учетом проектных ограничений. Для решения поставленной задачи использовался метод расширения пространства состояний, разработана трех-этапная процедура выбора параметров динамических фильтров и корректирующих воздействий: коэффициентов усиления, амплитуд функций с насыщением и параметров времени фильтров. Задача поддержания частоты вращения ротора синхронного генератора на уровне синхронной частоты решена с заданной точностью. Информация о неизмеряемых компонентах вектора состояния и о возмущениях, действующих на систему, получена с помощью наблюдателей на скользящих режимах.

Литература

1. ВЕНИКОВ В.А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*. – М.: Высшая школа, 1985. – 537 с.
2. ГУЛЮКИНА С.И., УТКИН В.А. *Задача слежения с учетом физических ограничений на фазовые переменные и управления* // Материалы 15-й Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого) (Москва, 2020). – М.: ИПУ РАН, 2020. –С. 141–145.

3. ГУЛЮКИНА С.И., УТКИН В.А. *Управление реактором с непрерывным перемешиванием в условиях неопределенности и с учетом ограничений на фазовые переменные и управления* // Проблемы управления. – 2021. – №5. – С. 48–59.
4. МЕЛЕШКИН Г.А., МЕРКУРЬЕВ Г.В. *Устойчивость энергосистем. Теория: Монография.* – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 350с.
5. *Синхронные генераторы* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.litenergo.ru/catalog/energeticheskoe-oborudovanie/sinkhronnye-generatory/> (дата обращения: 26.07.2021).
6. *Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления* / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – Ч II.
7. УТКИН В.А. Инвариантность и автономность в системах с разделяемыми движениями // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №11. – С. 73–94.
8. GUO Y., HILL D.J., WANG Y. *Nonlinear decentralized control of large-scale power systems* // Automatica. – 2000. – Vol. 36, No. 9. – P. 1275–1289.
9. КАКИМОТО N., NAKANISHI A., ТОМИЯМА K. *Instability of interarea oscillation mode by autoparametric resonance* // IEEE Trans. Power Syst. – 2004. – Vol. 19, No. 4. – P. 1961–1970.
10. KOSTEREV D.N., TAYLOR C.W., MITTELSTADT W.A. *Model validation for the WSCC system outage* // IEEE Trans. Power Syst. – 1999. – Vol. 14, No. 3. – P. 967–979.
11. LOUKIANOV A.G., CANEDO J.M., FRIDMAN L.M., SOTOCOTA A. *High-Order Block Sliding-Mode Controller for a Synchronous Generator With an Exciter System* // IEEE Trans. on Industrial Electronics. –2011. –Vol. 58, No. 1. – P. 337–347.
12. LOUKIANOV A.G., RIVERA DOMINGUEZ J., CASTILLO-TOLEDO B. *Robust sliding mode regulation of nonlinear systems* // Automatica. – 2018. – Vol. 89. – P. 241–246.

13. LU Q., MEI W., HU F., WU F., NI Y., SHEN T. *Nonlinear decentralized disturbance attenuation excitation control via new recursive design for multimachine power systems* // IEEE Trans. Power Syst. – 2001. – Vol. 16, No. 4. – P. 729–736.
14. LU Q., SUN Y.Z., MEI S. *Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics*. – Dordrecht, The Netherlands: Springer. – 2013.
15. MACHOWSKI J., ROBAK S., BIALEK J.W., BUMBY J.R., ABI-SAMRA N. *Decentralized stability-enhancing control of synchronous generator* // IEEE Trans. Power Syst. – 2000. – Vol. 15, No. 4. – P. 1336–1345.
16. MAHMUD M.A., POTA H.R., ALDEEN M., HOSSAIN M.J. *Partial feedback linearizing excitation controller for multimachine power systems to improve transient stability* // IEEE Trans. Power Syst. – 2014. – Vol. 29, No. 2. – P. 561–571.
17. SINGH A.K., PAL B.C. *Decentralized Nonlinear Control for Power Systems Using Normal Forms and Detailed Models* // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – Vol. 33, No. 2. –P. 1160–1172.
18. UTKIN V.A., GULYUKINA S.I. *Synthesis of invariant systems of given accuracy on the basis of the theory of sliding modes* // Proc. Int. Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2021. –P. 956–963.
19. WANG Y., CHENG D., LI C., GE Y. *Dissipative Hamiltonian realization and energy-based L2-disturbance attenuation control of multimachine power systems* // IEEE Trans. Autom. Control. – 2003. – Vol. 48, No. 8. – P. 1428–1433.
20. YAN R., DONG Z.Y., SAHA T.K., MAJUMDER R. *A power system nonlinear adaptive decentralized controller design* // *Automatica*. –2010. – Vol. 46, No. 2. – P. 330–336.
21. YAO W., JIANG L., FANG J., WEN J., CHENG S. *Decentralized nonlinear optimal predictive excitation control for multimachine power systems* // Int. J. Elect. Power Energy Syst. – 2014. – Vol. 55. – P. 620–627.

DYNAMIC COMPENSATION METHOD FOR SYNCHRO- NOUS GENERATOR CONTROL

Svetlana Gulyukina, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, junior researcher (gulyukina.s.i@mail.ru).

Abstract: In this paper we consider the problem of synthesis of automatic excitation control system (AECS) on the channel of angular speed stabilization of the synchronous generator rotor stabilization. The features of AECS should include limitations of minimum and maximum excitation, excitation rate of change, excitation forcing, swing damping, and stabilization of own and group motion. To solve this problem, the method of expanding the state space by introducing first-order filters into the feedback circuit is used. When the system is subjected to external disturbances, the use of deep feedbacks based on linear functions with saturation makes it possible, on the one hand, to solve the problem of tracking the output variables with a given accuracy and, on the other hand, to provide restrictions on the phase variables and controls. To obtain estimates of the unknown components of the system state vector and the uncoordinated external perturbations acting on the system, an observer is constructed on sliding modes. The results of numerical simulation in Matlab confirm the high efficiency of the proposed approach to the synchronous generator control.

Keywords: synchronous oscillator, tracking problem, space expansion method, constraints on phase variables and control.

УДК 62-501.2

ББК 30

DOI: 10.25728/ubs.2022.96.4

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.А. Уткиным.*

Поступила в редакцию 13.11.2021.

Опубликована 31.03.2022.