



УДК 621.314

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-20-26

**В. Н. АНОСОВ
Д. Н. БЕЛКОВА
В. М. КАВЕШНИКОВ**

Новосибирский государственный
технический университет,
г. Новосибирск

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА МАКСИМУМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА СУБГАРМОНИК ТОКА

В статье на основе метода оптимального управления Л. С. Понтрягина получены структура и параметры оптимального регулятора для активного фильтра субгармоник тока (АФСТ). Такой регулятор позволяет достичь полного подавления субсинхронных крутильных колебаний роторов газотурбинных установок (ГТУ) автономной электростанции на этапе возникновения и развития резонанса на одной из собственных частот крутильных колебаний ГТУ и предотвращения срабатывания виброзащиты и аварийного отключения электростанции. Подобные отключения приводят к большим экономическим и технологическим потерям.

Ключевые слова: крутильные субсинхронные колебания, радиальные вибрации, активный фильтр субгармоник тока, оптимальный регулятор, математическое моделирование, автономная электроэнергетическая система с оптимальным АФСТ.

Введение. На некоторых нефтегазовых месторождениях в мире, электроснабжение которых осуществляется от автономных электростанций, работающих на попутном газе, происходили отключения синхронных агрегатов по причине возникновения повышенной виброактивности газотурбинных установок (ГТУ). Эти отключения представляют собой аварийные события, приводящие к серьезным экономическим и технологическим потерям.

Исследования этих явлений [1–4] показали, что причиной виброактивности являются субгармоники тока, потребляемого нелинейными нагрузками электростанции (частотно-регулируемыми электроприводами погружных насосов).

Состояние исследований. В работе [1] отмечены основные факторы, которые ведут к распаду энергосистемы: источник пульсаций (в качестве которого служит частотно-регулируемый привод — ЧРП) и наличие редуктора между турбиной и генератором, в котором крутильные колебания переходят в поперечные.

Описание процесса возникновения радиальных вибраций и основные предлагаемые пути реше-

ния представлены в [5]. Тиристорный выпрямитель способен создавать субгармонические колебания входного тока выпрямителя с частотой, которая способна «плавать» в некоторых пределах, т.к. преобразователь вносит в систему дополнительный фазовый сдвиг из-за несоответствия между входным и выходными сигналами [6].

На данный момент отсутствуют эффективные средства для подавления виброактивности, возникающей по вышеуказанным причинам. Перепрограммирование преобразователей частоты и замена муфты являются дорогостоящими способами избежать колебаний на собственной частоте, кроме того, применение этих способов не всегда возможно в уже существующей системе. Отсутствие редуктора в ГТУ, чтобы избежать перехода к радиальным колебаниям, практически невозможно, т.к. скорость вращения газовой турбины чаще всего составляет 6000 об/мин, а скорость вращения генератора не может превышать 3000 об/мин для обеспечения стандартной частоты сети 50 Гц.

Качения ротора синхронной машины возникают вследствие субгармонических колебаний тока

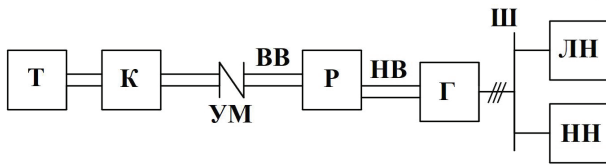


Рис. 1. Обобщенная электромеханическая схема автономной энергосистемы с однофазной ГТУ (Г — газовая турбина; К — компрессор; УМ — упругая муфта; ВВ и НВ — высокоскоростной и низкоскоростной валы редуктора соответственно; Р — редуктор; Г — синхронный генератор; Ш — сборные шины электростанции; ЛН и НН — линейные и нелинейные нагрузки электростанции соответственно)

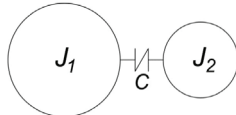


Рис. 2. Крутильная двухмассовая система (J_1 — момент инерции турбины, J_2 — момент инерции генератора, C — приведенный коэффициент жесткости упругой связи (соединяющей муфты))

в цепи якоря генератора. В качестве устройства для подавления низкочастотных колебаний на собственной частоте предлагается активный фильтр субгармоник тока (АФСТ). Для эффективного применения АФСТ необходимо разработать систему автоматического управления (САУ) и выбрать оптимальную точку подключения фильтра (или нескольких фильтров) к сети автономного энергорайона.

Выбор метода синтеза оптимального регулятора. Для нахождения функции управления для оптимального регулятора целесообразно использовать принцип максимума Понтрягина, т.к. данный метод позволяет найти не только траекторию оптимального управления, но и структуру и параметры регулятора [7, с. 300, 274–279], что соответствует поставленной задаче.

Математическое описание автономного энергорайона. Для возможности использования аналитических методов анализа и синтеза необходимо упрощенное математическое описание ГТУ и других элементов автономного энергорайона, которое, тем не менее, отражает свойства энергосистемы, существенные для проявления резонансных явлений. Обобщенная электромеханическая схема автономной энергосистемы с однофазной ГТУ представлена на рис. 1.

В дальнейшем при математическом описании системы с упругой муфтой (УМ) приняты следующие допущения:

1. Упругий элемент муфты подчиняется закону Гука во всём диапазоне реальных изменений угла φ , т.е. $C = const$. Это свойство УМ в составе ГТУ подтверждается самим наличием резонанса в исследуемом случае, поскольку с муфтой переменной жесткостью не может быть резонанса в полном смысле этого слова [8].

2. Жёсткость всех других элементов велика по сравнению с жесткостью УМ.

3. Муфта обладает малой демпфирующей способностью, что позволяет учитывать потери в ней

одним постоянным коэффициентом демпфирования.

4. Скорость вращения турбины постоянна, т.е. турбина обладает жёсткой механической характеристикой. Корректность этого допущения подтверждают результаты мониторинга мгновенных значений переменных ГТУ (в частности, частоты выходного напряжения) в период возникновения и развития резонанса. Это условие равнозначно условию стремления момента инерции турбины к бесконечности.

Учитывая допущения и упрощения, крутильная многомассовая система сведена к двухмассовой (рис. 2), содержащей в своем составе упругую муфту, соединяющую выходной вал газовой турбины и высокоскоростной вал редуктора, к низкоскоростному валу которого жестко присоединен вал синхронного генератора [9].

Система уравнений для данной двухмассовой системы:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = M_T - C\varphi - b \frac{d\varphi}{dt}; \\ J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = C\varphi + b \frac{d\varphi}{dt} - M_c; \\ \varphi = \varphi_1 - \varphi_2, \end{cases} \quad (1)$$

где φ — угол закручивания муфты; φ_1 — угол закручивания муфты со стороны турбины; φ_2 — угол закручивания муфты со стороны генератора; M_T — момент на валу турбины; M_c — модуль момента сил сопротивления, приведенный к входному валу машины (момент на валу генератора), определяемый электрической нагрузкой генератора (током в его фазах); b — приведенный коэффициент сопротивления; C — коэффициент жесткости упругой муфты.

Ввиду того, что турбина обладает жёсткой механической характеристикой и большим моментом инерции относительно ротора генератора, уравнение движения данной системы имеет следующий вид [10]:

$$J_2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + b \frac{d\varphi}{dt} + C\varphi = M_c, \quad (2)$$

где J_2 — приведенный момент инерции генератора.

Для исследования колебаний системы с упругой муфтой в уравнение было включено слагаемое, характеризующее изменение электромагнитного момента в виде положительной обратной связи с коэффициентом k_{oc} , которая связывает нагрузки, сеть и генератор.

$$J_2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + b \frac{d\varphi}{dt} + C\varphi = M_c + k_{oc} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3)$$

Правая часть уравнения (3) представляет собой суммарный момент на валу генератора. Первая составляющая — статический электромагнитный момент в установившемся режиме после сброса нагрузки, вторая составляющая характеризует колебания угла φ и электромагнитного момента.

Для определения значения коэффициента обратной связи необходимо математически представить процесс возникновения возмущения.

Пусть электростанция работает в установившемся режиме с постоянной скоростью ГТУ, постоянной нагрузкой на генераторе в некоторой точке угловой характеристики с координатами $M_{эм0}$, θ_0 с амплитудой тока нагрузки I_0 и напряжением на шинах U_0 , углом закручивания муфты φ_0 . Далее рассматриваемые переменные представляются в виде отклонений от точки установившегося режима, определяемого конкретным значением M_c .

При внезапном сбросе части линейной нагрузки (например, отключается асинхронный двигатель насоса мощностью 10–15 МВт) ротор генератора начинает колебаться около точки нового установившегося режима [11]. В условиях данной задачи рассматривается случай, когда частота колебаний совпадает с частотой собственных колебаний, обусловленной параметрами упругой муфты на высокоскоростном валу редуктора. Это приводит к колебаниям амплитуды напряжения на шинах генератора в соответствии с уравнением (4) (без учета активного сопротивления фазы статора).

$$\underline{U} = \underline{E}_f - X_1 I, \quad (4)$$

где $E_f = k_f \cdot i_f \cdot \omega$ — ЭДС возбуждения, индуцируемая полем взаимной индукции от МДС обмотки возбуждения; k_f — конструктивная постоянная генератора; i_f — ток возбуждения генератора; $\omega = \omega_0 + \frac{d\varphi}{dt}$ — скорость ротора в процессе колебаний; ω_0 — установившаяся скорость ротора; $\frac{d\varphi}{dt}$ — девиация скорости вращения ротора в процессе колебаний; X_1 — полное индуктивное сопротивление статора; I — ток фазы якоря.

Если считать, что $\frac{d\varphi}{dt}$ изменяется по синусоидальному закону с амплитудой ω_m , тогда $\frac{d\varphi}{dt} = \omega_m \sin\left(\frac{2\pi f_{ск}}{p} t\right)$, где $f_{ск}$ — собственная частота ГТУ; p — число пар полюсов генератора.

Вследствие значительной индуктивности обмотки возбуждения синхронного генератора (её постоянная времени 5–12 с) [12], замкнутый контур возбуждения системы АРВ имеет небольшую полосу пропускания (0,5–1,0 Гц) [13], что значительно меньше частоты собственных колебаний (около 12 Гц), рассматриваемой в работе.

Поэтому АРВ практически не в состоянии парировать колебания амплитуды напряжения такой частоты, и можно считать, что E_f будет определяться только девиацией скорости около установившегося значения.

Колебания напряжения на шинах генератора вызывают пропорциональные колебания амплитуды напряжения на всех уровнях напряжения локальной сети, в том числе на нелинейных нагрузках.

При наличии регулируемых тиристорных выпрямителей на входах нелинейных нагрузок (частотно-регулируемых электроприводов погружных электродвигателей) связь между входным напряжением и потребляемым из сети током оказывается линейной. Это следует из структуры уравнений, описывающих управляемые выпрямители, для которых колебания напряжения сети — возмущающее воздействие, действующее на объект аддитивно в отличие от мультипликативного воздействия управления [14]. Тогда ток нелинейных потребителей связан с напряжением питания линейно:

$$i_{номр} = k_i \cdot u_{номр}, \quad (5)$$

где $u_{номр}$ — напряжение питания нелинейных потребителей; k_i — коэффициент связи входных напряжения и тока нелинейных потребителей.

Для трехфазного синхронного генератора, работающего в симметричном режиме, электромагнитный момент определяется по уравнению [15]

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p \Psi_m I_m \cos \beta, \quad (6)$$

где $\Psi_m = \Phi_m \cdot w \cdot k_{обм}$ — амплитуда потокосцепления с фазной обмоткой; Φ_m — амплитуда потока через зазор на одном полюсном делении; w и $k_{обм}$ — число последовательно соединенных витков фазной обмотки и её обмоточный коэффициент; I_m — амплитуда фазного тока; β — угол между векторами тока якоря I и потокосцеплением фазной обмотки Ψ .

Выражение (6) будет справедливо как для установившегося, так и для переходного режима при условии, что амплитуда тока и потокосцепления учитываются в переходном процессе своими мгновенными значениями.

При $\Psi_m = const$ и $\beta = const$ (система после сброса нагрузки) электромагнитный момент связан с током фазы линейно, т.е.

$$M_{эм} = k_m I_m, \quad (7)$$

где $k_m = \frac{3}{2} p \Psi_m \sin \beta = const$ — коэффициент пропорциональности.

Поэтому сброс части электрической нагрузки приводит к пропорциональному снижению механического момента на валу генератора M_c , т.е. механический момент в статическом (установившемся) режиме пропорционален электрической нагрузке генератора.

Следовательно, при субгармонических колебаниях амплитуды тока I_m , частота которых определяется частотой собственных колебаний ГТУ, $M_{эм}$ изменяется с той же частотой, что приводит к резонансному росту амплитуды колебаний ротора генератора и лавинообразному росту амплитуды радиальных вибраций.

Исходя из рассмотренного выше, крутильные колебания ротора генератора с частотой собственных колебаний ГТУ вызывают колебания фазного тока и электромагнитного момента с той же частотой и фазой, т.е. создаётся положительная обратная связь, приводящая к неустойчивости комплекса «генератор-сеть-нагрузка».

Рассмотрев совместно (4)–(7) и исключив промежуточные переменные, получим

$$M_{эм} = \frac{k_m k_f k_i i_f \omega_0}{\sqrt{1 + X_1^2 k_i^2}} + \frac{k_m k_f k_i i_f}{\sqrt{1 + X_1^2 k_i^2}} \cdot \frac{d\varphi}{dt}. \quad (8)$$

Выделив переменную составляющую (отклонение электромагнитного момента от установившегося значения), получим коэффициент обратной связи k_{oc} .

$$M_{эм} = k_{oc} \frac{d\varphi}{dt},$$

$$k_{oc} = \frac{k_m k_f k_i i_f}{\sqrt{1 + X_1^2 k_i^2}}. \quad (9)$$

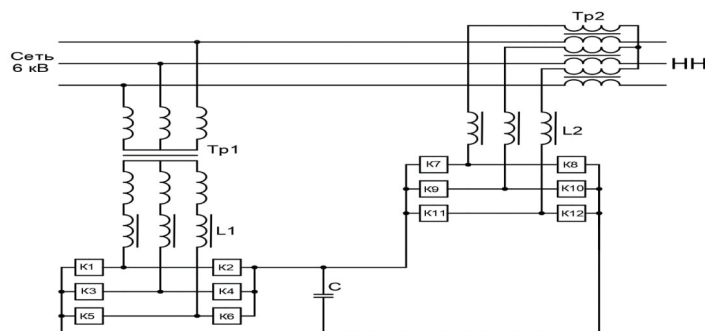


Рис. 3. Функциональная схема силовой части АФСТ

Активный фильтр субгармоник тока. Функциональная схема силовой части предлагаемого технического решения для подавления субгармонических колебаний тока в сети, соответственно, и в обмотке статора генератора, построена на базе комбинированного фильтро-компенсирующего устройства, включающего параллельный фильтр напряжения и последовательный фильтр тока (рис. 3).

На рис. 3: Тр1 — понижающий трансформатор; Тр2 — повышающий трансформатор; L1, L2 — трехфазные дроссели; К1...К12 — транзисторно-диодные ключи; С — накопительный конденсатор; НН — нелинейные нагрузки).

Для работы АФСТ необходима информация о токе и напряжении в точке подключения АФСТ со стороны сети, позволяющая сформировать сигнал управления инвертором, который через повышающий трансформатор, изменяющий напряжение в точке подключения, управляет током, сглаживая колебания его амплитуды.

$\Delta u_n = k_u \frac{d\varphi}{dt}$ — изменение напряжения на клеммах потребителей.

Пусть $k_u = \frac{k_f i_f}{\sqrt{1 + X^2 k_i^2}} \cdot \frac{1}{k_{mp}}$ — коэффициент, связывающий напряжение потребителя с колебаниями ротора генератора относительно статического режима; k_{mp} — суммарный коэффициент трансформации между напряжением генератора и напряжением у потребителей. Тогда общий коэффициент, связывающий колебания напряжения у потребителей с колебаниями электромагнитного момента генератора

$$k_{oc} = k_m \cdot k_u \cdot k_i$$

и, следовательно,

$$\Delta M_{эм} = k_m k_u k_i \frac{d\varphi}{dt} = k_m k_i \Delta u_n. \quad (10)$$

Цель разработки САУ для АФСТ — эффективное и быстрое подавление колебаний тока и напряжения сети в точках ввода — вывода фильтра. Пусть управление АФСТ осуществляется через повышающий трансформатор. При возрастании амплитуды тока, регулятор должен способствовать зарядке конденсатора (взятие мощности из сети), при уменьшении амплитуды тока наоборот (отдача мощности в сеть через Тр2). Задача состоит в том, чтобы динамический момент свести к нулю, т.е.

$$\Delta M_{эм} = k_m k_i (\Delta u_n + u_{вн}) =$$

$$= k_m k_i \left(k_u \frac{d\varphi}{dt} + u_y k_{инв} k_{вн} \right) \rightarrow 0. \quad (11)$$

Здесь u_y — сигнал управления инвертором; $k_{инв}$ — коэффициент передачи инвертора; $k_{вн}$ — коэффициент трансформации повышающего трансформатора.

Принцип максимума даёт необходимые и достаточные условия для оптимального управления, если процесс линейный и подчиняется аддитивной функции управления [16].

Учитывая вышесказанное, математическое описание объекта управления с регулятором может быть представлено в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_c}{J_2} - 2\gamma\omega - \lambda^2\varphi + \frac{k_m k_i}{J_2} (k_u \omega + u_y k_{инв} k_{вн}), \end{cases} \quad (12)$$

где $\gamma = \frac{b}{2J_2}$ — коэффициент демпфирования; $\lambda^2 = \frac{c}{J_2}$ — квадрат собственной частоты.

Используя метод максимума Понтрягина, который позволяет разработать оптимальный регулятор и определить его параметры, сформулируем критерий оптимальности [16] в виде

$$I = \int_0^T \left(k_u^2 k_i^2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + L u_y^2 \right) dt \rightarrow \min, \quad (13)$$

где L — множитель Лагранжа.

Математическая постановка задачи. Пусть объект управления описывается системой (12), а управляющее воздействие подчинено ограничению

$$\int_0^T u_y^2 dt = C_0. \quad (14)$$

Определить оптимальное управляющее воздействие u_y , обращающее в минимум функционал с введенным множителем Лагранжа (13).

Решение.

Введем дополнительную переменную x

$$\frac{dx}{dt} = k_u^2 k_i^2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + L u_y^2.$$

Составим функцию Понтрягина

$$\rho = \sum_{i=1}^n b_i x_i(t);$$

$$\rho = b_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + b_\omega \frac{d^2\varphi}{dt^2} + b_x x, \quad (15)$$

где b_i — некоторые известные постоянные, входящие в функцию Понтрягина (зависящие от координат, условия максимума или минимума которых должны быть найдены).

При $b_\varphi = 0, b_\omega = 0, b_x = 1$

$$\rho = x(t).$$

Составляем функцию Гамильтона (гамильтониан):

$$H = \sum_{i=1}^n p_i(t) f(y, u, t),$$

где y — вектор состояний фазовых координат (φ, ω, x); u — вектор управления u_y .

$$H = p_\omega \omega + p_\varphi \left(\frac{M_c}{J_2} - 2\gamma\omega - \lambda^2\varphi + \frac{k_m k_i}{J_2} (k_u \omega + u_y k_{инв} k_{ва}) \right) + p_x (k_u^2 k_i^2 \omega^2 + Lu_y^2), \quad (16)$$

где p_φ, p_ω, p_x — вспомогательные функции.

Определяем значение u_y , максимизирующее функцию H :

$$\frac{\partial H}{\partial u_y} = p_\omega \frac{k_m k_i k_{инв} k_{ва}}{J_2} + 2p_x Lu_y = 0. \quad (17)$$

Отсюда оптимальное управляющее воздействие u_y

$$u_y^o = -p_\omega \frac{k_m k_i k_{инв} k_{ва}}{2p_x L J_2}. \quad (18)$$

Составляем уравнения для определения вспомогательных функций $p_\omega(t)$ и $p_x(t)$:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial y},$$

$$\begin{cases} \frac{dp_\varphi}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \varphi} = p_\omega \lambda^2; \\ \frac{dp_\omega}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \omega} = -p_\varphi + 2\gamma p_\omega - \frac{p_\omega k_m k_i k_u}{J_2} - 2p_x k_u^2 k_i^2 \omega; \\ \frac{dp_x}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Решая систему (18), получим:

$$p_x = C_x \Rightarrow p_x = -1. \quad (20)$$

$$p_\varphi = \lambda^2 \int p_\omega dt. \quad (21)$$

$$\frac{dp_\omega}{dt} = -\lambda^2 \int p_\omega dt + 2\gamma p_\omega - \frac{p_\omega k_m k_i k_u}{J_2} + 2k_u^2 k_i^2 \omega. \quad (22)$$

Подставим (20) в (18) и получим:

$$u_y^o = -p_\omega \frac{k_m k_i k_{инв} k_{ва}}{2L J_2}. \quad (23)$$

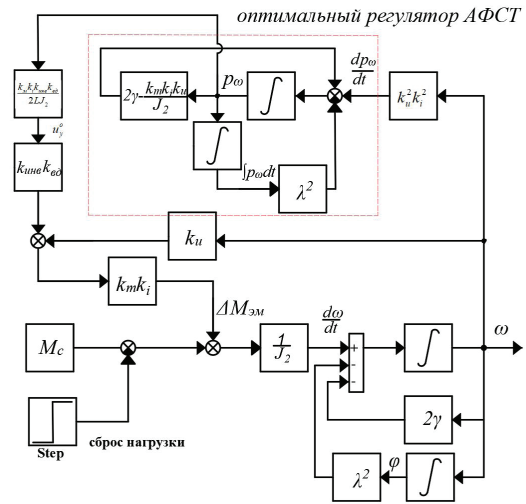


Рис. 4. Структурная схема системы с оптимальным регулятором

Исходя из уравнений (12), (22) и (23), составляем структурную схему системы с оптимальным регулятором (рис. 4).

На схеме блок Step математически моделирует сброс части линейных нагрузок, провоцирующий возникновение и развитие резонанса в энергосистеме.

Если рассмотреть только сопряженную систему и считать, что $\Delta\omega = 0$, то

$$\frac{dp_\omega}{dt} = -\lambda^2 \int p_\omega dt + 2\gamma p_\omega - \frac{p_\omega k_m k_i k_u}{J_2} + 2k_u^2 k_i^2 \omega_0. \quad (24)$$

Множитель Лагранжа L можно определить подстановкой приведенного выражения для оптимального управляющего воздействия в ограничивающее условие:

$$\int_0^T \left(p_\omega \frac{k_m k_i k_{инв} k_{ва}}{2L J_2} \right)^2 dt = C_o. \quad (25)$$

Что, в свою очередь, приводит к дифференциальному уравнению:

$$\frac{d^2 p_\omega}{dt^2} - \left(2\gamma - \frac{k_m k_i k_u}{J_2} \right) \frac{dp_\omega}{dt} + \lambda^2 p_\omega = 0. \quad (26)$$

Решение этого уравнения даёт для множителя Лагранжа выражение:

$$L = \frac{2J_2 (e^{p_1 T/4} - e^{p_2 T/4})}{k_m k_i k_{инв} k_{ва}} \times \frac{C_o}{\sqrt{\frac{e^{2p_1 T} - 1}{2p_1} - \frac{2e^{(p_1 + p_2)T} - 1}{(p_1 + p_2)} - \frac{e^{2p_2 T} - 1}{2p_2}}}, \quad (27)$$

где p_1 и p_2 — корни дифференциального уравнения (26), C_o — значение интегрального ограничения, определяемое разработчиком конкретной системы.

Моделирование. На рис. 5 дана схема моделирования, соответствующая функциональной схеме на рис. 4. Сброс электрической нагрузки имитируется сбросом соответствующей части электромаг-

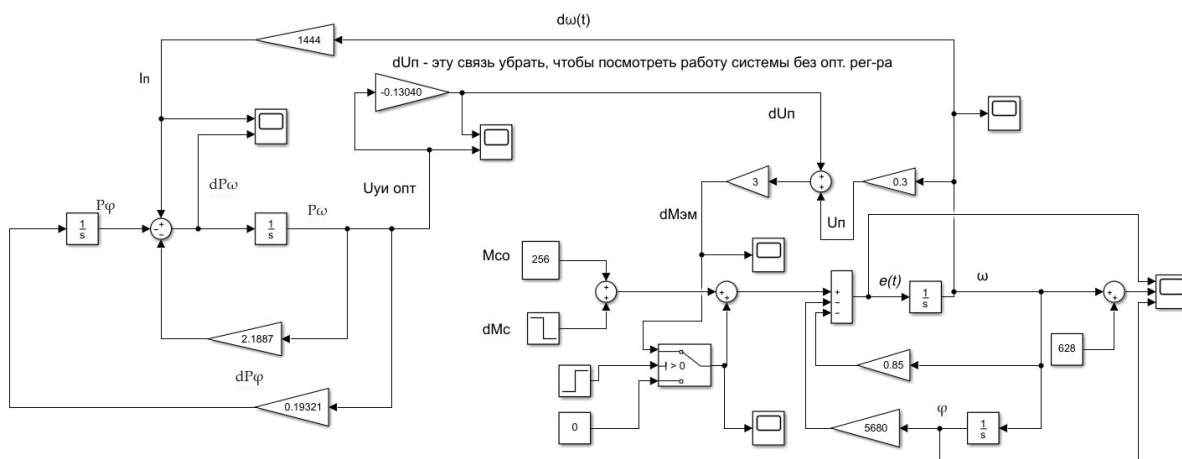


Рис. 5. Структурная схема системы с оптимальным регулятором в Matlab Simulink
 $M_{co} = 256$; $dM_c = -25,6$ (эти цифры представляют собой отношение момента вращения к приведенному моменту инерции), что соответствует 10 % от начальной нагрузки. Время моделирования равно 100 с

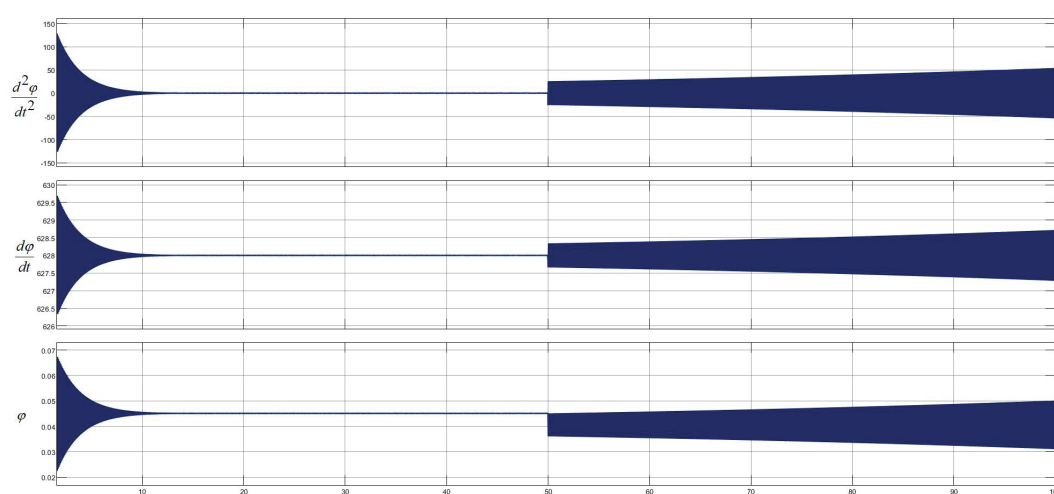


Рис. 6. Переходный процесс без оптимального регулятора

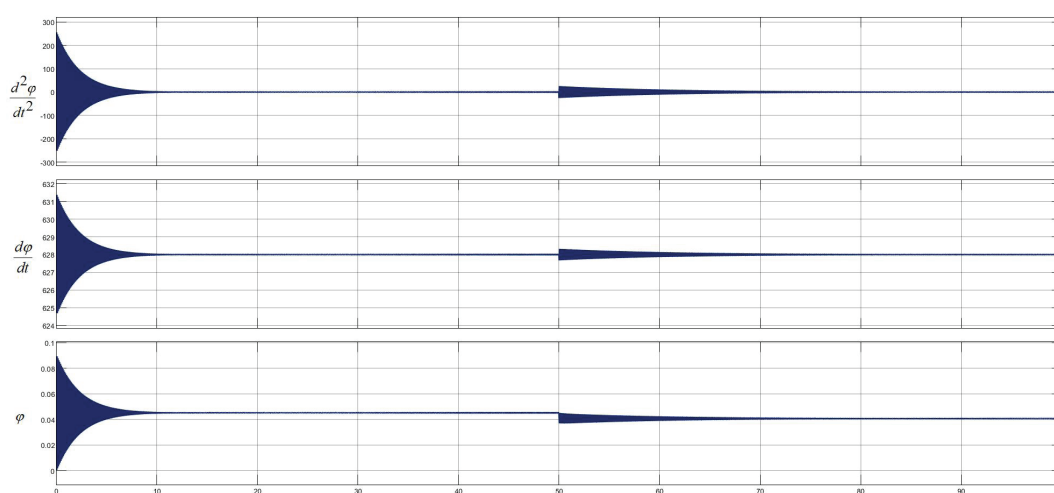


Рис. 7. Переходный процесс с оптимальным регулятором

нитного момента, равного изменению M_c в установившемся режиме dM_c . Исследования проводились при различных величинах M_c и dM_c .

Приведенные в работе графики переходных процессов (рис. 6 и 7) получены при начальном

значении статического момента M_{co} , равном номинальному электромагнитному моменту генератора, а величина сброса электрической нагрузки и, следовательно, сброса электромагнитного момента, равного сбросу механического момента на валу ге-

нератора dM_c в статике, составляет 10 % номинальной нагрузки.

Результаты моделирования. Переходные процессы в системе без оптимального регулятора (рис. 6) и при работе оптимального регулятора (рис. 7) показывают, что работа оптимального АФСТ приводит к быстрому подавлению субсинхронных колебаний, не позволяя развиться резонансу в системе. Часть переходного процесса в интервале времени 0–10 с вызвана неточностью соответствия начальных условий всех переменных системы друг другу, которую не удается устранить полностью из-за ограниченной разрядности. После 10 с существует начальный установившийся режим системы, на фоне которого происходит сброс нагрузки и дальнейшее развитие процессов.

Заключение. Применение принципа максимума потребовало разработки упрощенного математического описания сложного объекта управления, содержащего электромеханические, электронные, механические и электротехнические элементы различных уровней мощностей и напряжений. Однако такое упрощение позволило получить структуру и параметры регулятора, доставляющего минимум физически понятному и обоснованному функционалу при интегральном ограничении, наложенном на управляющее воздействие.

Значительные упрощения и допущения, принятые в ходе решения поставленной задачи, требуют доказательства эффективности применения полученного при указанных условиях регулятора в энергосистеме с АФСТ с математическим описанием, максимально приближенном к реальному объекту.

Такую возможность дают современные версии пакета моделирующих программ MATLAB Simulink, используемые в дальнейших исследованиях.

Библиографический список

1. Трунин Е. С., Тараканов В. М., Бойкин С. П. [и др.]. Крутильные колебания на ГТУ и возможность распада изолированной энергосистемы // *Электрические станции*. 2017. № 1 (1026). С. 20–24.
2. Илюшин П. В. Проблемные технические вопросы работы объектов распределенной генерации в составе энергосистемы и подходы к их решению // *Энергоэксперт*. 2015. № 1. С. 58–62.
3. Masuda H., Ogashi Yo., Tsukakoshi M., Yoshimura M. Comparison between electrical drives in LNG plant for subsynchronous torsional interactions. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/3be8/6ccea49daffecb0ab6e93ce23aca8f70f584.pdf> (дата обращения: 03.10.2019).
4. Belyaev A. N., Smolovik S. V. Suppression of Weakly-Damped Torsional Oscillations in Autonomous Power Systems // *Power Technology and Engineering*. 2018. Vol. 52, Issue 1. P. 102–109. DOI: 10.1007/s10749-018-0917-1.
5. Белкова Д. Н., Кавешников В. М. Проблема подавления торсионных колебаний в системах распределенной генерации

электроэнергии // *Наука. Технологии. Инновации*: сб. науч. тр. В 9 ч. Ч. 5. Энергетика. 2018. С. 146–149. ISBN 978-5-7782-3738-4.

6. Шипило В. П. Автоматизированный вентильный электропривод. М.: Энергия, 1969. 400 с.
7. Теория автоматического управления. В 2 ч. / под ред. А. В. Нетушила. М.: Высшая школа, 1972. Ч. 2. 430 с.
8. Иванов М. Н., Финогенов В. А. Детали машин. 12-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2008. 407 с. ISBN 978-5-06-005679-2.
9. Мелешкин Г. А., Меркурьев Г. В. Устойчивость энергосистем: моногр. В 2 кн. СПб., 2006. Кн. 1. 369 с.
10. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1990. 592 с.
11. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2004. Т. 2. 532 с. ISBN 5-7046-0913-9; 5-7046-0914-7.
12. Вольдек А. И. Электрические машины. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
13. Максимов Ю. И., Павлюченков А. М. Эксплуатация судовых синхронных генераторов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1976. 200 с.
14. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
15. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. 256 с.
16. Ту Ю. Современная теория управления / пер. с англ. Я. Н. Гибадулина, под. ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1971. 472 с.

АНОСОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (ЭАПУ).

SPIN-код: 4217-1371

AuthorID (РИНЦ): 494767

Адрес для переписки: anosovvn@gmail.com

БЕЛКОВА Диана Николаевна, студентка гр. ЭМ-63 факультета мехатроники и автоматизации.

Адрес для переписки: belkova34diana@gmail.com

КАВЕШНИКОВ Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры ЭАПУ.

SPIN-код: 7570-8364

AuthorID (РИНЦ): 494774

Адрес для переписки: vldi@yandex.ru

Для цитирования

Аносов В. Н., Белкова Д. Н., Кавешников В. М. Применение принципа максимума для оптимизации активного фильтра субгармоник тока // *Омский научный вестник*. 2019. № 6 (168). С. 20–26. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-20-26.

Статья поступила в редакцию 15.10.2019 г.

© В. Н. Аносов, Д. Н. Белкова, В. М. Кавешников