

В. П. КАЛЯВИН, Ч. В. НГУЕН, Х. Т. ТА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Рассматривается возможность применения метода чувствительности функции передачи для анализа диагностической модели гребной электрической установки в целях построения алгоритма проверки степени ее работоспособности.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, диагностическая модель, диаграмма прохождения сигналов, диагностическое обеспечение.

Разработка диагностического обеспечения при проектировании гребной электрической установки (ГЭУ) начинается с выбора типа или построения ее диагностической модели, метод анализа которой с использованием теории чувствительности функции передачи является возможным перспективным направлением исследований.

В настоящей статье рассматривается метод анализа диагностической модели ГЭУ в виде диаграммы прохождения сигналов (ДПС) ориентированного графа. Использование для анализа модели теории чувствительности функции передачи [1] позволяет на основе функциональной схемы ГЭУ построить ДПС; на следующем этапе выбираются контрольные точки и диагностические признаки модели; далее определяется последовательность проверок блоков модели по частотным характеристикам ГЭУ и на последнем этапе составляется алгоритм проверки степени ее работоспособности.

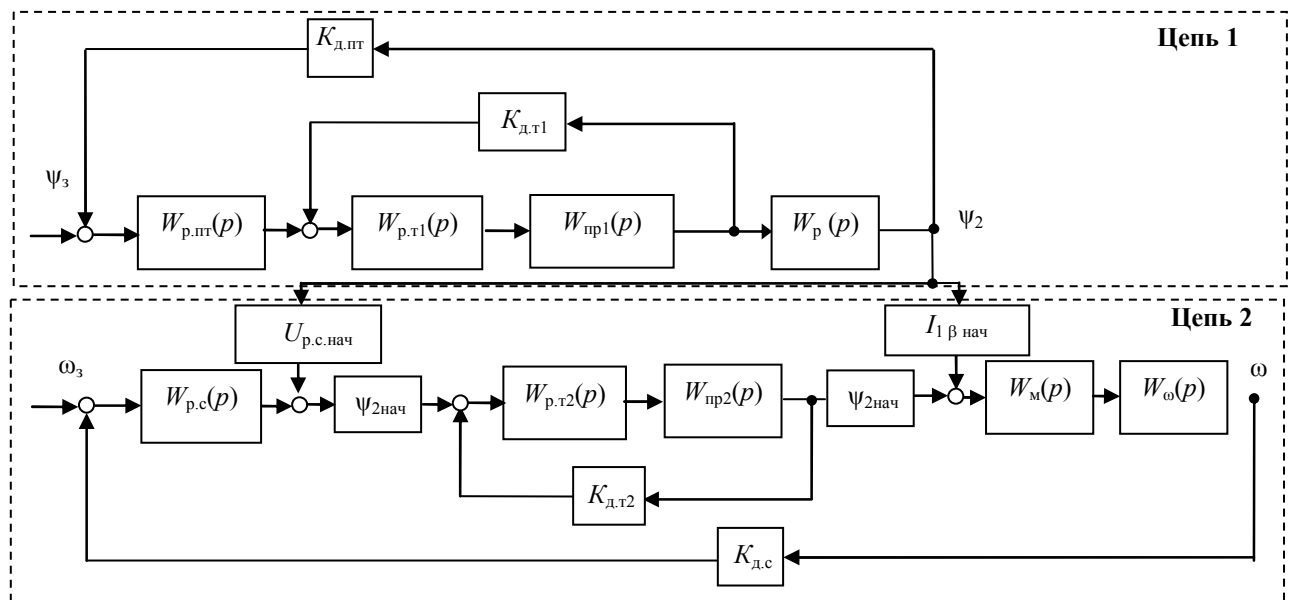


Рис. 1

Функциональная схема гребной электрической установки [2] представлена на рис. 1, где цепь 1 — схема регулирования потокосцепления, цепь 2 — схема регулирования частоты вращения; $W_{p.пт}(p)$, $W_{p.т1}(p)$, $W_{p.т2}(p)$, $W_{p.с}(p)$ — передаточные функции (ПФ) регуляторов потокосцепления, токов и скорости вращения вала гребного электродвигателя (ГЭД) соответственно; $K_{д.пт}$, $K_{д.т1}$, $K_{д.т2}$, $K_{д.с}$ — коэффициенты датчиков; $W_{п.ч}(p)$ — передаточная функция преобразователя частоты; $W_p(p)$, $W_m(p)$, $W_\omega(p)$ — передаточные функции цепи ротора, электромагнитного момента и частоты вращения ГЭД соответственно; Ψ_2 , Ψ_3 — потокосцепление и

заданное значение потокосцепления; ω , ω_3 — частота вращения вала ГЭД и ее заданное значение; $\psi_{2\text{нач}}$, $U_{p.c.\text{нач}}$ — начальные значения потокосцепления и напряжения регулятора скорости вращения ГЭД (в настоящей работе эти значения будем считать равными единице); $W_{\text{пр}1}(p)$, $W_{\text{пр}2}(p)$ — передаточные функции преобразователя тока; $I_{1\beta\text{нач}}$ — начальное значение составляющей тока статора по оси β .

В схеме учитывается возможность регулирования не только потокосцепления, но и частоты вращения вала гребного винта по принципу векторного управления. В данном случае системе стабилизации потокосцепления ротора обеспечивается условие автономности [2].

Диаграмма прохождения сигналов представляет собой ориентированный граф — графическое изображение соотношений между несколькими переменными. Для построения диагностической модели ГЭУ в виде ДПС (рис. 2) на основе функциональной схемы принято следующее:

— вершины диаграммы (0...5, 0...7) соответствуют переменным (параметрам ГЭУ) и обозначаются индексом соответствующего сигнала;

— ветви диаграммы ($w_{1...7}$, $a_{1...9}$) имеют операторы (передаточные функции), обозначенные соответствующей зависимостью с указанием направления;

— физические величины, приведенные на функциональной схеме ГЭУ (см. рис. 1) обозначены как напряжения сигналов, проходящих в ветвях диаграммы: $U_{3.t1}$, $U_{3.t2}$, $U_{3.c}$ — сигналы задания тока и скорости вращения ГЭД соответственно; U_α , U_β — сигналы составляющих тока по осям α и β соответственно; $U_{п.ч.\alpha}$, $U_{п.ч.\beta}$ — сигналы преобразователя частоты по осям α и β ; U_{i_d} — сигнал тока статора.

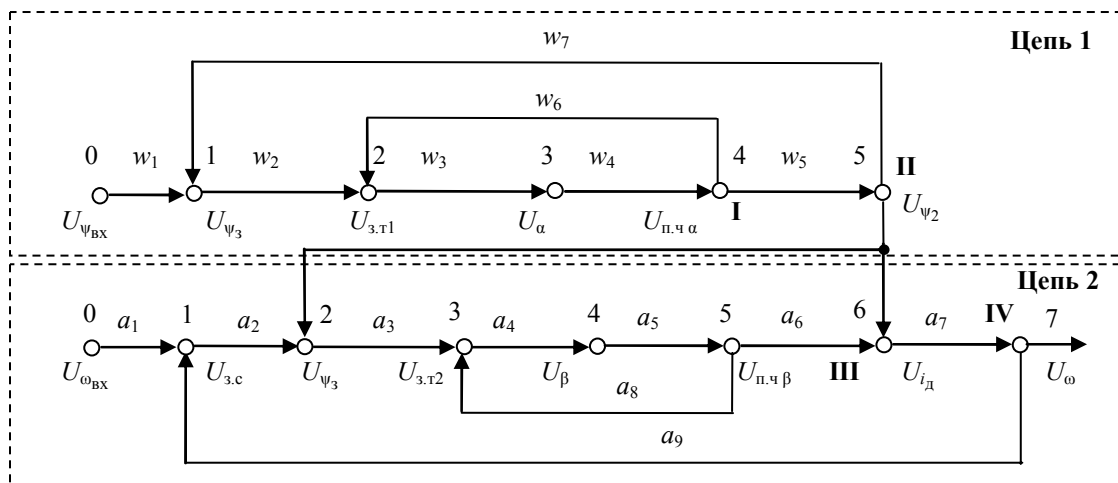


Рис. 2.

Анализ диагностической модели показывает, что операторы в разной степени влияют на работоспособность системы в зависимости от их местоположения на диаграмме. Степень влияния можно оценивать абсолютной и относительной чувствительностью функции передачи ГЭУ к изменению операторов.

Абсолютная чувствительность определяется по формуле [3]

$$F_{W_{ij}}^{T_{0k}} = \frac{\partial T_{0k}}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial}{\partial W_{ij}} \left(P_k \frac{\Delta_k}{\Delta} \right);$$

на практике чаще применяется формула для относительной чувствительности функции передачи:

$$S_{W_{ij}}^{T_{0k}} = \frac{\partial \ln T_{0k}}{\partial \ln W_{ij}} = \frac{\partial T_{0k}}{\partial W_{ij}} \frac{W_{ij}}{T_{0k}} = \frac{F_{W_{ij}}^{T_{0k}} W_{ij}}{T_{0k}},$$

где T_{0k} — функция передачи в цепи (от входа к выходу k); P_k — „прямой“ путь прохождения сигнала; Δ — определитель подграфа; Δ_k — определитель подграфа „не охватывающего“ прямой путь P_k .

Выбор необходимых контрольных точек осуществляется с помощью анализа таблиц чувствительности функций [4]. Анализ таблиц сводится к сравнению функций $S_{W_{ij}}^{T_{0k}}$ и нахождению в результате функции передачи, которая является наилучшей согласно следующему правилу: функция передачи T_n важнее функции T_m , если чувствительность $S_{W_{ij}}^{T_n} > S_{W_{ij}}^{T_m}$.

В результате анализа таблиц выбираются контрольные точки (на рис. 2 эти точки обозначены как I, II, III, IV) и строится алгоритм проверок контроля состояния ГЭУ в случае снижения степени ее работоспособности.

Контрольные точки определяют порядок проверок и соответствуют следующим параметрам: напряжению преобразователя частоты $U_{п.ч.}$, потокосцеплению ψ_2 , току статора i_d и частоте вращения грибоного винта $\omega_{г.в.}$. Таким образом, совокупность диагностических признаков для ГЭУ формируется как

$$\Xi_{ГЭУ} = (U_{п.ч.}, \psi_2, i_d, \omega_{г.в.}).$$

Для разработки алгоритма поиска причин, приводящих к снижению степени работоспособности ГЭУ, применяется метод чувствительности функции передачи к изменениям отдельных операторов в разных контрольных точках по частотным характеристикам [1], в результате чего определяется последовательность проверки всех операторов ГЭУ.

Заменив оператор интеграла p в каждой ПФ на $j\omega$, можно определить (на фиксированных частотах) логарифмические чувствительности [1]:

$$\frac{\partial \ln A(\omega)}{\partial \ln A_l(\omega)} = \left| \frac{\partial A(\omega)}{\partial A_l(\omega)} \frac{A_l(\omega)}{A(\omega)} \right|; \quad \frac{\partial \ln \varphi(\omega)}{\partial \ln \varphi_l(\omega)} = \left| \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \varphi_l(\omega)} \frac{\varphi_l(\omega)}{\varphi(\omega)} \right|,$$

где $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ и $A_l(\omega)$, $\varphi_l(\omega)$ — амплитудная и фазовая частотные характеристики соответственно ГЭУ и l -го оператора.

В этом случае применяется критерий

$$u_l = \left| \frac{\partial A(\omega_i)}{\partial A_l(\omega_i)} \frac{A_l(\omega_i)}{A(\omega_i)} \right| + \left| \frac{\partial \varphi(\omega_i)}{\partial \varphi_l(\omega_i)} \frac{\varphi_l(\omega_i)}{\varphi(\omega_i)} \right|,$$

где l — номер оператора, для которого вычисляется u_l .

При этом частотные характеристики определяются следующим образом:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{a^2(\omega) + b^2(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)}}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{b(\omega)c(\omega) - a(\omega)d(\omega)}{a(\omega)c(\omega) + b(\omega)d(\omega)} \right),$$

где

$$a(\omega) = \cos(\Sigma_0 \Pi_0); \quad b(\omega) = \sin(\Sigma_0 \Pi_0); \quad \Pi_0 = \prod_{i \in N_k} A_i(\omega); \quad \Sigma_0 = \sum_{i \in N_k} \varphi_i(\omega);$$

$$c(\omega) = 1 + \sum_{k=1}^n \Pi_k \cos \Sigma_k; \quad d(\omega) = \sum_{k=1}^n \Pi_k \sin \Sigma_k; \quad \Pi_k = \prod_{i \in N_k} A_i(\omega); \quad \Sigma_k = \sum_{i \in N_k} \varphi_i(\omega),$$

здесь N_k — множество индексов вершин на прямом пути P_k .

В зависимости от расположения оператора на диаграмме значение критерия u_l будет определяться различными выражениями [1].

Алгоритм вычислений критерия u_i для нахождения причины снижения степени работоспособности ГЭУ разработан на основе программы языка Visual C (рис. 3). Алгоритм используется для ГЭУ переменного тока, в которой присутствуют четыре контура в диаграмме прохождения сигналов. Возможно применение алгоритма для любого объекта, имеющего более одного контура, диагностическая модель которого описывается в виде ДПС. Исходными данными для алгоритма являются:

- заданная функциональная схема для расчета в виде файла .txt, в том числе, количество операторов в схеме (G) и число замкнутых контуров (C);
- диаграмма прохождения сигналов по прямым путям и обратным связям;
- число контрольных точек ($КТ_i$) и их расположение на схеме;
- фиксированная частота ω_i .

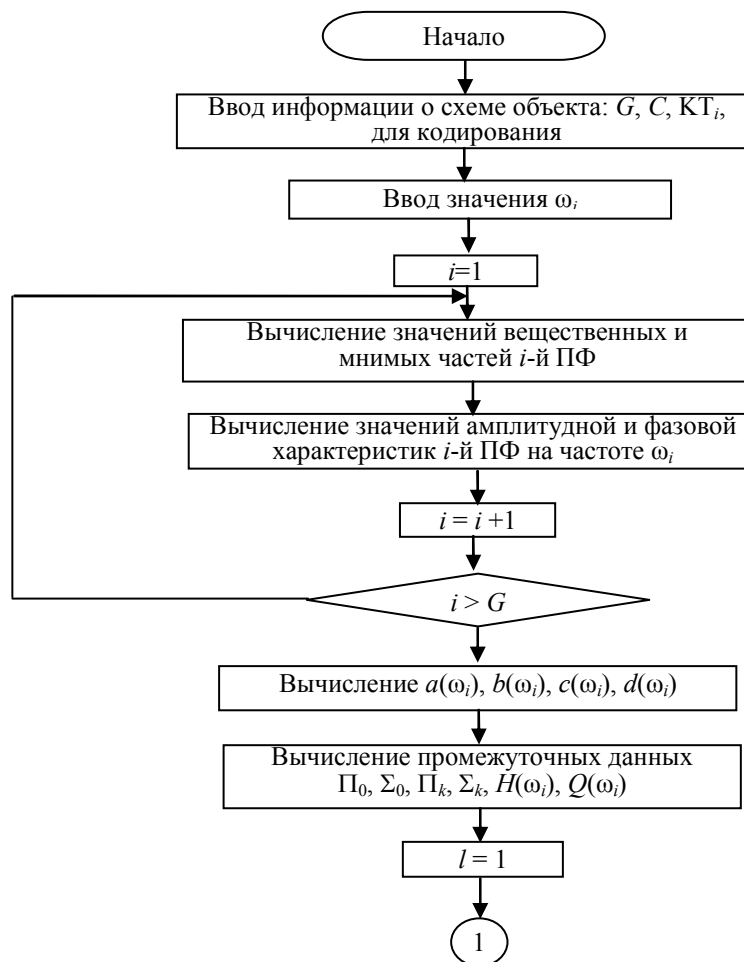
Алгоритм предусматривает последовательное вычисление:

- значений вещественных $Re(\omega_i)$ и мнимых $Im(\omega_i)$ частей всех ПФ в комплексной форме: $Re(\omega_i) + j Im(\omega_i)$;

- значений амплитудной A_i и фазовой ϕ_i характеристик i -й ПФ на частоте ω_i ;

- значений частотных характеристик $a(\omega_i)$, $b(\omega_i)$, $c(\omega_i)$, $d(\omega_i)$ и промежуточных коэффициентов $H(\omega_i)$, $Q(\omega_i)$.

Далее, в зависимости от положения операторов на диаграмме выделяются три варианта (обозначаемые как Index=1, 2, 3) вычисления критерия u_i , после чего осуществляется упорядочение его значения по убыванию.



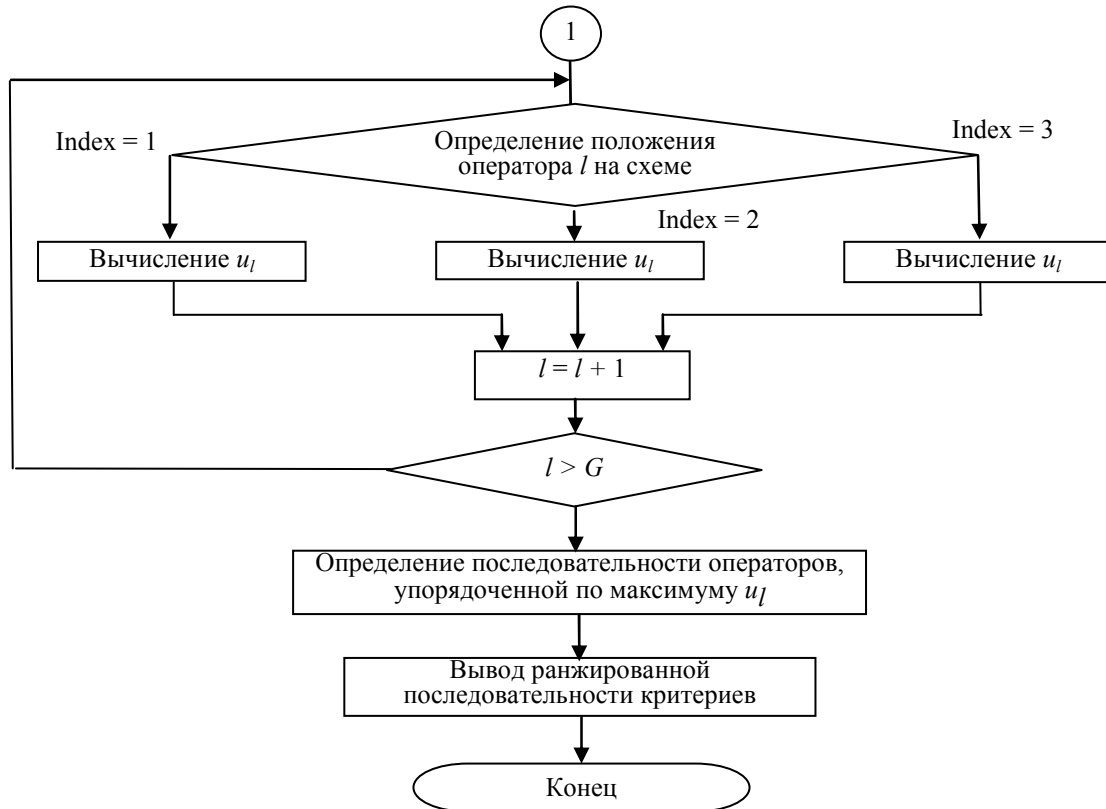


Рис. 3

Представленные в статье метод определения контрольных точек для гребной электрической установки и алгоритм вычисления чувствительности всех ПФ ГЭУ по критерию частотных характеристик позволяют оценить состояние ГЭУ и реализовать алгоритм поиска причины снижения ее степени работоспособности, что обеспечивает частичное решение задачи разработки диагностического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мозгалецкий А. В., Калявин В. П., Костанди Г. Г. Диагностирование электронных систем / Под ред. А. В. Мозгалецкого. Л.: Судостроение, 1984.
2. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учеб. пособие. Л.: Энергоиздат, 1982.
3. Ким Р. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. Калявин В. П., Рыбаков Л. М. Надежность и диагностика элементов электроустановок: Учеб. пособие. СПб: Элмор, 2009.

Сведения об авторах

- Владимир Петрович Калявин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления
- Чьен Ван Нгуен** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: qc_etu@yahoo.com
- Хай Тхань Та** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: thanhhai136@yahoo.com

Рекомендована кафедрой
систем автоматического управления

Поступила в редакцию
15.04.11 г.