

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.

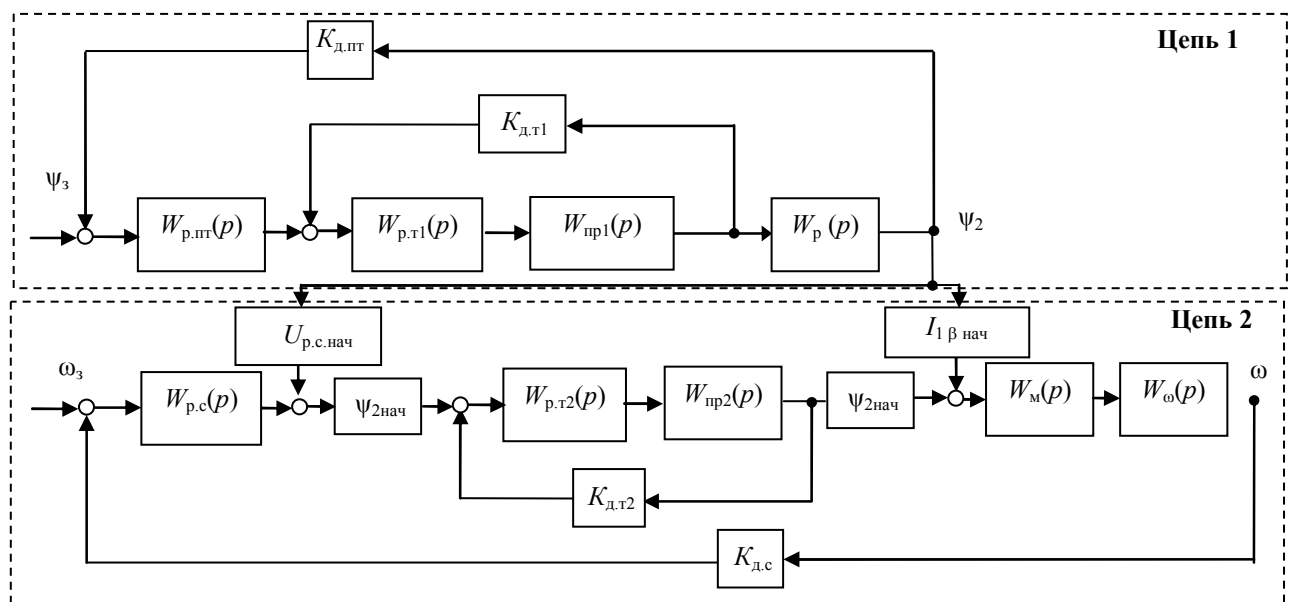


Рис. 1

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;  $\Psi_2$ ,  $\Psi_3$  — потокосцепление и

заданное значение потокосцепления;  $\omega$ ,  $\omega_3$  — 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);  $W_{\text{пр1}}(p)$ ,  $W_{\text{пр2}}(p)$  — передаточные функции преобразователя тока;  $I_{1\beta\text{нач}}$  — начальное значение составляющей тока статора по оси  $\beta$ .

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;  $U_\alpha$ ,  $U_\beta$  — сигналы составляющих тока по осям  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно;  $U_{п.ч.\alpha}$ ,  $U_{п.ч.\beta}$  — сигналы преобразователя частоты по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $U_{i.d}$  — сигнал тока статора.

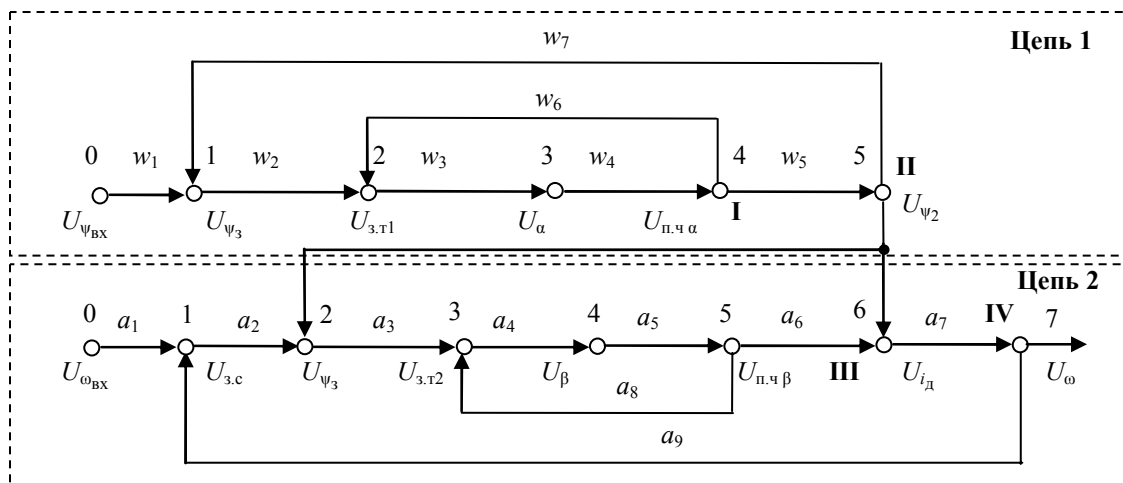


Рис. 2.

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;  $\Delta$  — определитель подграфа;  $\Delta_k$  — 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  $\psi_2$ , 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  $\omega_i$ .

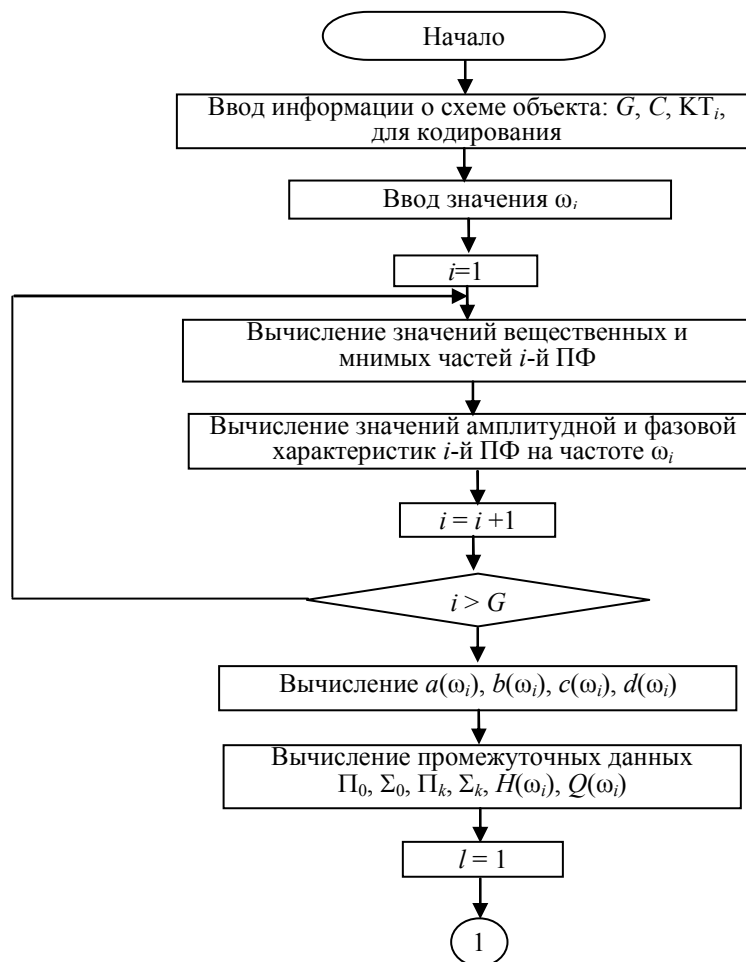
Алгоритм предусматривает последовательное вычисление:

- 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  $\phi_i$  характеристик  $i$ -й ПФ на частоте  $\omega_i$ ;

- 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.



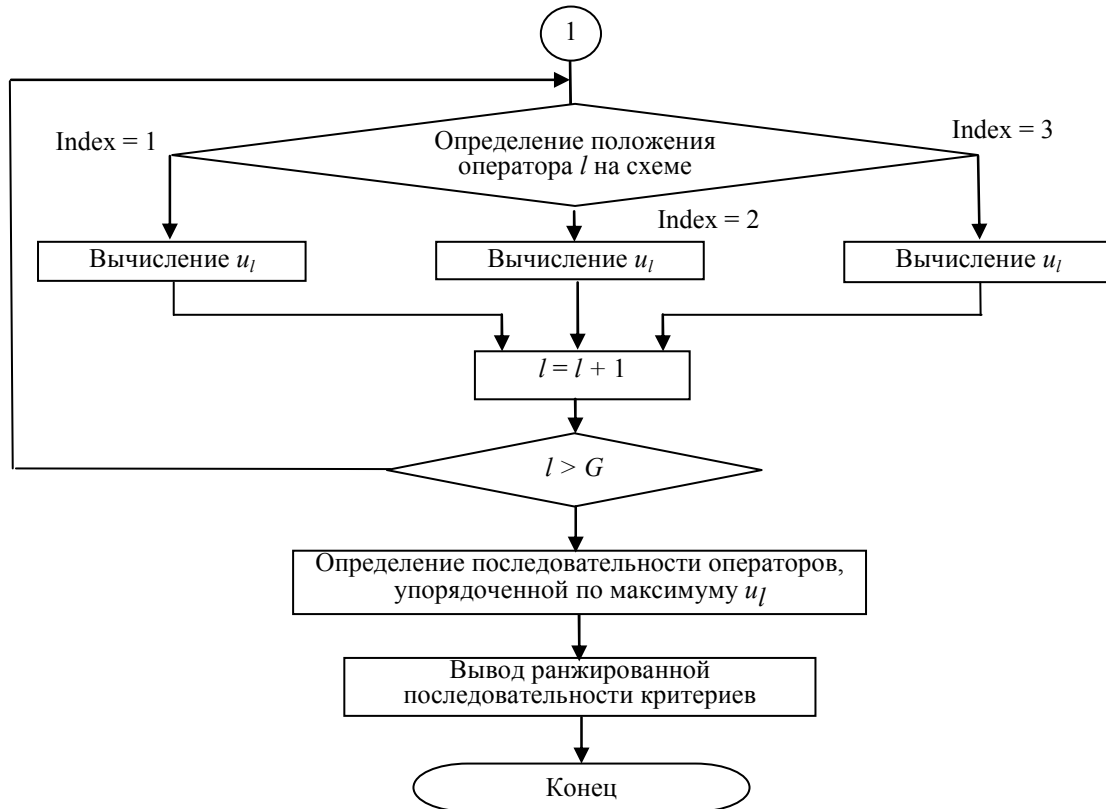


Рис. 3

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.