

УДК 621.3.076

А.С. ГЛАЗЫРИН, к.т.н., доцент
К.Н. НЕГОДИН, студент гр. 5Г2А
И.Г. СЛЕПНЁВ, студент гр. 5Г2А
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ НАСТРОЙКЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА ЛИНЕАРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Введение. В современных системах электроприводов для формирования сигналов обратных связей использование датчиков угловой скорости является нецелесообразным или невозможным в ряде случаев. Для решения этой проблемы используют наблюдатели, которые на основе сигналов от датчиков тока и напряжения и математической модели восстанавливают оценки требуемых величин. При построении такого наблюдателя формируется сигнал невязки между оценкой тока и измеренным током с помощью датчика. Эта невязка может быть преобразована согласно пропорциональному (П-принципу) и пропорционально-интегральному (ПИ-принципу) принципам [1]. Такие наблюдатели требуют точной настройки корректирующих звеньев для адекватной работы. Проблема настройки корректирующих звеньев относится к проблемам теории оптимизации.

Цель исследования. Целью представленной работы является исследование граничных условий задачи оптимизации при настройке наблюдателя полного порядка для линеаризованного электромеханического объекта.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели было необходимо решить ряд задач:

- исследовать граничные условия оптимизации настройки наблюдателя, причем варьируемыми параметрами являются коэффициенты усиления невязки $K_{л1}$, $K_{л2}$ и постоянная времени $T_{л2}$ пропорционально-интегрального контура компенсации момента сопротивления в структуре наблюдателя;
- определить насколько не совпадают координаты точек минимумов для целевой функции невязки по току и интегрального критерия качества оценивания угловой скорости, рассчитанные на основе положений теории автоматического управления при заданных пределах интегрирования;

- выявить различия процессов оптимизации при разных переходных режимах работы наблюдателя, таких как пуск и наброс нагрузки.

Математическая модель объекта исследования. На начальном этапе исследования была смоделирована система «двигатель постоянного тока независимого возбуждения – наблюдатель полного порядка» по системе дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{U_3(t)}{L} - \frac{\omega(t) \cdot c_{дв}}{L} - \frac{i(t) \cdot R_{ящгор}}{L} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{i(t) \cdot c_{дв}}{J_{эКВ}} - \frac{M_c(t)}{J_{эКВ}} \\ \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= \frac{\hat{i}(t) \cdot (c_{дв} + K_{л2})}{J_{эКВ}} - \frac{i(t) \cdot K_{л2}}{J_{эКВ}} - \frac{(i(t) - \hat{i}(t)) \cdot c_{дв}}{J_{эКВ} \cdot T_{л2}} \\ \frac{d\hat{i}}{dt} &= \frac{U(t)}{L} - \frac{\hat{i}(t) \cdot R_{ящгор}}{L} - \frac{[i(t) - \hat{i}(t)] \cdot K_{л1}}{L} - \frac{\hat{\omega} \cdot c_{дв}}{L} \end{aligned} \right. , (1)$$

На основе вышеуказанной математической модели в программном обеспечении *Mathcad* были получены переходные процессы для двигателя 2ПФ200ЛГУХЛ4, 15 кВт, 220 В, параметры которого взяты из [2].

Методы исследования. При проведении исследований были применены методы известные из теории систем автоматического управления, численные методы, элементы теории оптимизации.

Для решения вышеупомянутых задач применяется интегральная оценка качества, которая представляет собой определенный интеграл по времени от невязки по току или ошибки оценивания по угловой скорости в рассматриваемом наблюдателе [3].

Рассогласование между динамическими траекториями в исследуемом объекте и наблюдателе в теории автоматического управления принято численно оценивать на основе интегральных критериев качества переходных процессов:

$$\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} f(t) \phi(\hat{t}) dt + R = J + R \quad (2)$$

где $t_{нач}$, $t_{кон}$ – граничные интервалы рассматриваемого переходного режима, т.е. начало и конец переходного процесса; $f(t)$ – подынтегральная функция, в качестве которой рассматриваются функция от времени невязки по току $\Delta \hat{i}(t)$ и функция от времени ошибки оценивания угловой скорости $\Delta \hat{\omega}(t)$

в наблюдателе; $\varphi(t)$ – приближенное значение функции $f(t)$, показывающее влияние выбранного метода численного интегрирования; J – приближенное значение интеграла; R – остаточный член аппроксимации, определяющий погрешность вычисления.

Рассматриваемые подынтегральные функции $f(t)$ и $\varphi(t)$, как правило, являются знакопеременными. Для устранения знакопеременности подынтегральной функции применяют операции выделения модуля или возведения в квадрат [3]. В данной статье представлены результаты при использовании операции выделения модуля.

Обсуждение результатов исследования.

Полученные значения интегральных оценок исследуемого наблюдателя при пуске сведены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Зависимость интегральной оценки ошибки по угловой скорости при пуске

Тл ₂ , Н*с/ (кг*М) Кл ₂ , Гн/с	0,01 5	0,02	0,03 5	0,05	0,1	0,18 5	0,25	0,3	1,5
1	2,36 1	2,210	2,05 1	2,00 2	1,97 5	2,00 4	2,03 4	2,05 6	2,33 7
3	2,36 9	2,216	2,05 6	2,00 6	1,97 4	1,99 4	2,01 5	2,03 0	2,19 1
5	2,37 6	2,223	2,06 1	2,01 0	1,97 5	1,98 6	2,00 1	2,01 2	2,11 5
5,5	2,37 8	2,225	2,06 2	2,01 1	1,94 8	1,98 5	1,99 9	2,00 9	2,10 1
6	2,38 0	2,226	2,06 4	2,01 2	1,97 5	1,98 4	1,99 6	2,00 5	2,08 9
6,5	2,38 2	2,228	2,06 5	2,01 3	1,97 5	1,98 2	1,99 4	2,00 2	2,07 8
7	2,38 4	2,230	2,06 6	2,01 4	1,97 6	1,98 1	1,99 2	2,00 0	2,06 9
9	2,39 2	2,237	2,07 2	2,01 9	1,97 7	1,97 8	1,98 5	1,99 1	2,03 9
11	2,40 0	2,243	2,07 7	2,02 3	1,97 9	1,97 6	1,98 0	1,98 4	2,01 8

Табл. 2. Зависимость интегральной оценки невязки по току при пуске

Тл ₂ , Н*с/ (кг*М) Кл ₂ , Гн/с	0,004 5	0,0047 5	0,00 5	0,007 5	0,01	0,03 5	0,05	0,07 5	0,1
1	6,768	5,230	4,83 9	3,607	3,47 2	4,73 1	5,43 8	6,42 1	7,23 7
3	5,819	5,264	4,86 5	3,613	3,47 2	4,68 2	5,35 4	6,26 9	7,01 1
5	5,862	5,297	5,46 2	3,620	3,47 3	4,63 6	5,27 4	6,12 9	6,80 7
5,5	5,873	5,306	4,89 9	3,621	3,47 3	4,62 5	5,25 5	6,09 6	6,75 9
6	5,884	5,314	4,90 6	3,623	3,47 3	4,61 4	5,23 6	6,06 3	6,71 2
6,5	5,895	5,321	4,91 3	3,625	3,47 3	4,60 3	5,21 8	6,03 1	6,66 7
7	5,906	5,331	4,92 0	3,626	3,47 3	4,69 2	5,19 9	6,00 0	6,62 2
9	5,994	5,366	4,94 9	3,633	3,47 4	4,55 0	5,12 8	5,87 9	6,45 3
11	5,994	5,401	4,97 7	3,640	3,47 4	4,50 9	5,06 1	5,76 8	6,29 9

Графическая интерпретация данных таблиц представлена на рис. 1

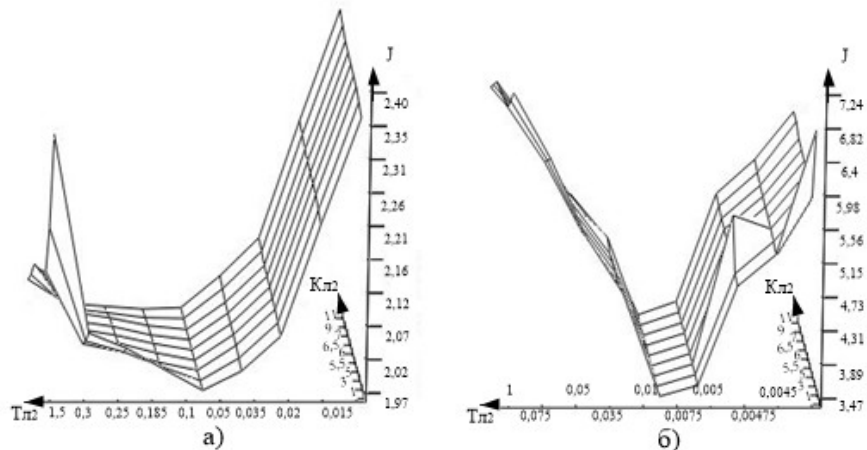


Рис. 1. Зависимости интегральной оценки от коэффициента усиления невязки $K_{л2}$ и постоянной времени $T_{л2}$ при пуске а) по угловой скорости; б) по току

Полученные значения интегральных оценок исследуемого наблюдателя при набросе нагрузки сведены в табл. 3 и 4.

Табл. 3. Зависимость интегральной оценки ошибки по угловой скорости при набросе нагрузки

$T_{л2}, Н*с / (кг*М)$ $K_{л2}, Гн/с$	0,00 47	0,00 49	0,00 5	0,007 5	0,01	0,03 5	0,05	0,07 5	0,1
30	0,16 7	0,09 6	0,12 2	0,040	0,04 9	0,11 2	0,13 9	0,17 1	0,19 5
35	0,23 7	0,15 4	0,09 1	0,044	0,04 9	0,10 8	0,13 1	0,16 0	0,18 0
40	0,28 2	0,18 3	0,09 3	0,043	0,04 8	0,10 3	0,12 5	0,15 0	0,16 1
50	0,26 7	0,15 0	0,18 3	0,040	0,04 7	0,09 6	0,11 4	0,13 4	0,14 7
60	0,42 6	0,27 1	0,14 8	0,042	0,04 5	0,09 0	0,10 5	0,12 1	0,13 2
65	0,46 4	0,28 1	0,20 6	0,036	0,04 6	0,08 7	0,10 1	0,11 6	0,12 5
70	0,46 1	0,26 1	0,26 9	0,042	0,04 6	0,08 4	0,09 7	0,11 1	0,11 9
75	0,51 6	0,30 5	0,28 2	0,046	0,04 4	0,08 2	0,09 4	0,10 6	0,11 4
80	0,63 8	0,39 7	0,26 1	0,039	0,04 4	0,07 9	0,09 1	0,10 2	0,10 9

Табл. 4. Зависимость интегральной оценки ошибки по току при набросе нагрузки

$T_{л2}, Н*с / (кг*М)$ $K_{л2}, Гн/с$	0,007 5	0,008 5	0,009 5	0,0097 5	0,01	0,03 5	0,05	0,07 5	1
200	0,217	0,209	0,223	0,227	0,23 0	0,37 9	0,41 2	0,44 1	0,50 8

220	0,246	0,206	0,216	0,217	0,22 2	0,35 3	0,38 1	0,40 6	0,46 2
240	0,301	0,215	0,209	0,209	0,21 6	0,33 1	0,35 5	0,37 7	0,42 5
245	0,293	0,200	0,217	0,206	0,20 9	0,32 6	0,34 9	0,37 0	0,41 6
250	0,285	0,214	0,209	0,214	0,20 6	0,32 1	0,34 4	0,36 4	0,40 8
255	0,327	0,243	0,200	0,216	0,21 4	0,31 6	0,33 8	0,35 8	0,40 0
260	0,391	0,244	0,206	0,204	0,21 6	0,31 1	0,33 3	0,35 2	0,39 3
280	0,535	0,302	0,208	0,213	0,22 5	0,29 4	0,31 3	0,32 9	0,36 5
300	0,786	0,395	0,226	0,242	0,24 5	0,27 8	0,29 5	0,31 0	0,34 1

На рис. 2. приведены зависимости интегральной оценки от коэффициента усиления невязки $K_{л2}$ и постоянной времени $T_{л2}$

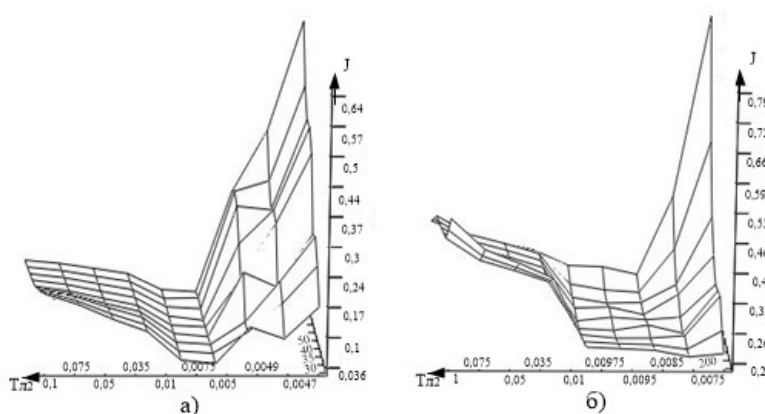


Рис. 2. Зависимости интегральной оценки от коэффициента усиления невязки $K_{л2}$ и постоянной времени $T_{л2}$ при набросе нагрузки а) по угловой скорости; б) по току

Выводы:

1. При исследовании граничных условий было выявлено, что значения интегральных критериев качества переходных процессов при оптимальных решениях лежат в диапазонах 1,974...1,979 для угловой скорости и 3,472...3,474 для тока в режиме пуска, а для режима наброса нагрузки 0,044...0,049 и 0,214...0,245 соответственно.
2. Координаты точек минимумов целевой функции невязки по току и интегрального критерия качества оценивания угловой скорости при пуске частично совпадают, а именно $K_{л2}$ имеет значение 6 Гн/с, а $T_{л2}$ 0,1 Н*с/(кг*м) для $\Delta \hat{\omega}(t)$ и 0,01 Н*с/(кг*м) для $\Delta \hat{I}(t)$. Для режима

наброса нагрузки напротив $T_{л2}$ имеет одинаковые значения 0,01 Н*с/

(кг*м), а K_{L2} принимают значения 60 Гн/с для $\Delta \hat{\omega}(t)$ и 250 Гн/с для

$\Delta \hat{I}(t)$.

3. Процессы оптимизации для разных режимов имеют значительное расхождение полученных результатов. При пуске в оптимальных значениях коэффициента усиления невязки K_{L2} и постоянной времени T_{L2} , наблюдатель работает устойчиво, а при набросе нагрузки наблюдатель теряет запасы устойчивости, чего можно избежать, воспользовавшись другим интегральным критерием.

Список используемых источников

1. Глазырин А.С. Пропорциональный и пропорционально-интегральный принципы обработки невязки в наблюдателе полного порядка электромеханического объекта с линеаризованной моделью // Научный вестник НГТУ. –2015. –Т. 58. № 4. – с. 28-39.
2. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.3. Электрические машины постоянного тока в системах автоматизированного электропривода: учебное пособие / Л.С. Удут, Н.В. Кояин, О.П. Мальцева. – Издание 2-е переработанное и дополненное. – Томск: издательство Томского политехнического университета, 2007. – 152 с.
3. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е. перераб. и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.