

Кравченко В. В.

Донбасская  
государственная  
машиностроительная  
академия

Посвящается памяти соратника П.С. Берника – А.И. Дрыге

УДК 621.01:621.87

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМ ВИБРОКОМПЛЕКСОМ

Розглядаються результати розробки засобів для автоматизації розрахунку параметрів системи керування електрогідромеханічним віброкомплексом.

In the article describe the results developing methods automation counting parameters control system of hydro-electrical vibration complex.

Успешное решение основной задачи машиностроения, заключающейся в интенсификации машиностроительного производства и повышении качества выпускаемой продукции, существенно зависит от разработки и практического применения современных технологических процессов и оборудования, к которым относится вибростабилизирующая обработка изделий, обеспечивающая постоянство их геометрических размеров за счет снижения внутренних остаточных напряжений и микропластических деформаций путем виброобработки поверхностей на специальных

технологических вибрационных машинах или комплексах [1, 2].

Важнейшей частью виброкомплекса является состоящая из электрической (ЭП) и гидромеханической (ГМП) подсистем, система управления приводом электромеханического дебалансного вибровозбудителя (рис 1), осуществляющего вибрационное воздействие на обрабатываемую деталь при помощи упругих механических звеньев, приводящихся во вращение электродвигателем постоянного тока с частотой вращения  $\omega$ , зависящей от частоты виброобработки.

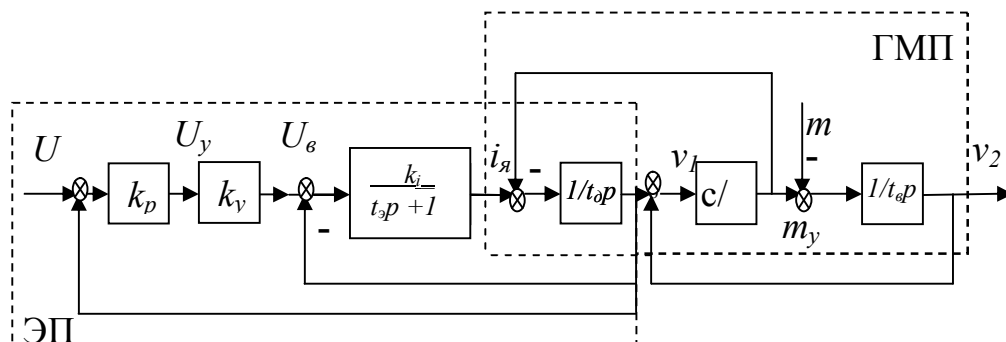
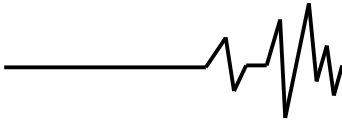


Рис. 1. Структурная схема электрогидромеханической системы управления приводом вибровозбудителя



Наличие в приводе упругих механических звеньев приводит к изменению нагрузки на валу двигателя с моментом  $m = M \sin \omega t$  ( $M$  - максимальное значение момента), что в диапазоне частот виброобработки является причиной вынужденных колебаний тока якоря, приводящих к дополнительной перегрузке электродвигателя и снижению энергии вибровоздействия. Естественно, что определение оптимальных параметров электрогидромеханической системы, позволяющий повысить энергию вибрационной обработки, является на сегодняшний день актуальной задачей.

Однако, в связи со снижением по понятным причинам объемов машиностроительного производства в последнее время, наметилось уменьшение интереса производителей к технологическому процессу вибрационной обработки, в частности к методам расчета оптимальных параметров системы управления. Так в работах [3-5], описывающих перспективные направления применения виброкомплексов, совершенствованию методов расчета, уделяется недостаточно внимания. В тоже время широкий спектр использования методов виброобработки к различным типам технологических операций (литье, сварка,ковка, механообработка) и видам изделий (балки, станины, валки, корпуса) делает «ручной» расчет необходимых характеристик процесса весьма трудоемким и достаточно сложным делом, зачастую содержащим ошибки вычислительного характера.

Поэтому целью данной работы является автоматизация расчетов по выбору оптимальных характеристик вибровозбудителя и системы управления, обеспечивающих повышение энергии вибровоздействия. Основные задачи работы – разработка математической и информационной моделей, а также соответствующего программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс вычислений и освободить его от рутинных ошибок. Пренебрегая в первом приближении силами вязкого трения, которое согласно [6] не превышают 10% от максимального давления в электрогидросистеме для разработки математической модели воспользуемся аналитическими зависимостями, полученными в [7], разбив и преобразовав их в соответствии с целью настоящей работы. При этом для поддержания преемственности с работой [7] и ясности выполненных ниже преобразований сохраним принятые в ней обозначения.

Согласно [7] передаточная функция  $W(p)$  для возмущающего воздействия  $m$  на ток якоря двигателя  $i_a$  определяется по формуле:

$$W(p) = i(p) / m(p), \quad (1)$$

где  $i(p) = k_i k_p k_{y_e}$  - коэффициенты усиления разомкнутой системы;  $k_i$  - коэффициент передачи якорной цепи двигателя;  $k_p$  - коэффициент усиления регулятора скорости;  $k_{y_e}$  - коэффициент усиления управляемого выпрямителя;  $m(p) = \gamma t_\delta t_3 t_y^2 p^4 + \gamma t_\delta t_y p^3 + \gamma [t_\delta t_3 + k_i(1 + k_p k_e) t_y^2] p^2 + \gamma t_\delta p + k_i(1 + k_p k_{y_e}) = 0$  - характеристическое уравнение;  $\gamma = (t_\delta + t_e) / t_\delta$  - коэффициент соотношений инерционных масс механических постоянных двигателя  $t_\delta$  и вибровозбудителя  $t_e$ ;  $t_3$  - электромагнитная постоянная времени якоря;  $t_y = 1 / \omega_{12}$  - постоянная времени упругих колебаний;  $\omega_{12}$  - собственная частота упругих механических колебаний двухмассовой системы двигатель-вибровозбудитель. Собственная частота упругих механических колебаний вычисляется по формуле:

$$\omega_{12} = [c_{12}(t_\delta + t_e) / t_\delta t_e]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $c_{12}$  - коэффициент жесткости механической передачи. Коэффициент электромеханического воздействия  $k_v$  определяется по формуле:

$$k_v = t_\delta t_3 / k_s t_y^2, \quad (3)$$

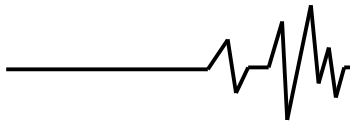
где  $k_s = k_i(1 + k_p k_{y_e})$ , а коэффициент электродинамического демпфирования собственного электропривода  $\xi_d$  - по формуле (4)

$$\xi_d = 0,5(t_\delta / k_s t_3)^{1/2}. \quad (4)$$

Как следует из результатов работы [7] динамические свойства системы строго определяются показателями  $k_v$ ,  $\xi_d$  и  $\gamma$  оптимальные значения которых задаются формулами (5)

$$k_v = 1 / \gamma, \xi_d = \sqrt{(\gamma - 1) / \gamma}, \gamma = 5. \quad (5)$$

Так как при проектировании системы управления параметры электродвигателя  $t_\delta$ ,  $t_3$ ,



$k_i$  и  $k_{yв}$  известны наперед, то исходя из оптимальных значений (5) можно определить оптимальное значение остальных показателей и как следствие получить оптимальное значение тока якоря, обеспечивающее

стабильность поддержания частоты виброобработки  $\omega$ .

Исходя из соотношений (5) получим, что оптимальное значение  $k_v$  и  $\xi_d$  равны:

$$k_v = 1/\gamma = 0,2; \xi_d = \sqrt{(\gamma-1)/\gamma} = 2/\sqrt{5}. \quad (6)$$

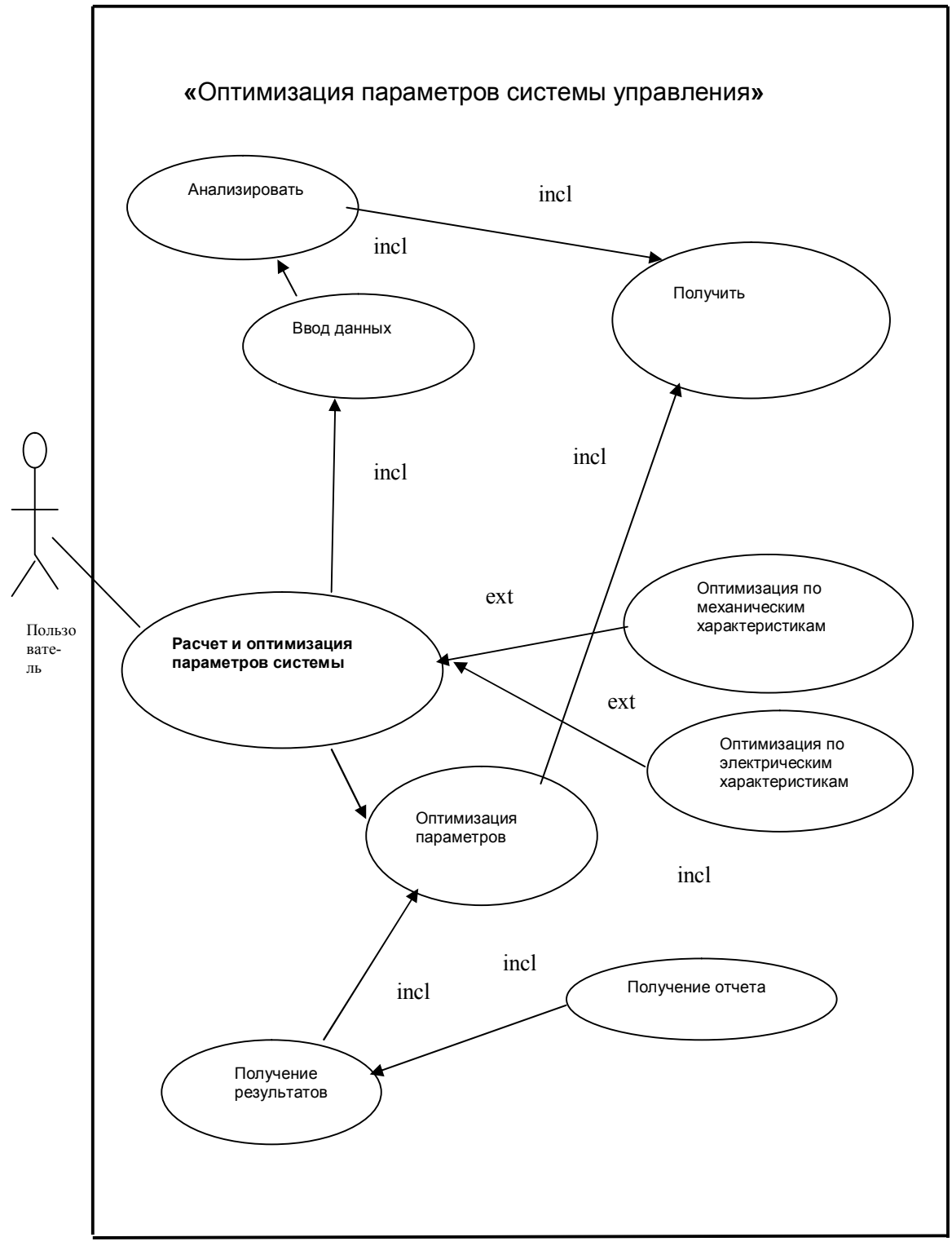
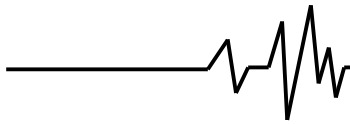


Рис. 2. Диаграмма прецедентов программного комплекса «Vibrosis»



Тогда значение механической постоянной вибровозбудителя определится по формуле:

$$t_e = (\gamma - 1) t_\delta \quad (7)$$

Подставив  $t_e$  из (7) в (2) и опуская промежуточные преобразования, получим значение собственной частоты  $\omega_{12}$

$$\omega_{12} = \{c_{12}\gamma / [t_\delta(\gamma - 1)]\}^{1/2} \quad (8)$$

С учетом формул (8) и (3) постоянная времени упругих колебаний  $t_y$  определяется по формуле:

$$t_y = [t_\delta(\gamma - 1) / c_{12}\gamma]^{1/2} \quad (9)$$

Разрешая выражение (3) относительно неизвестного  $k_3$  с учетом соотношений (6) и (9), получим:

$$k_3 = 6,25t_3c_{12} \quad (10)$$

На основании соотношения (10) из формулы  $k_3 = k_i(1 + k_p k_{y\delta})$  можно найти, что оптимальное значение коэффициента усиления регулятора скорости определяется выражением:

$$k_p = (k_3 - k_i) / k_i k_{y\delta} \quad (11)$$

Тогда, оптимальный ток якоря  $k_o$  определится по формуле:

$$k_o = 6,25t_3c_{12} - k_i \quad (12)$$

Разработку информационной модели для программного комплекса (ПК) «Vibrosis» в соответствии с принципами объектно-

ориентированного проектирования [8] начнем с построения диаграммы прецедентов, описывающей статическое поведение системы и показанной на рис.2.

Основной прецедент – «Расчет и оптимизация параметров системы» характеризует расчет по математической модели (1-12) электрических и механических характеристик системы управления и их дальнейшую оптимизацию. Данный прецедент включает в себя несколько прецедентов, которые в свою очередь взаимодействуют с другими прецедентами системы для оптимизации параметров системы управления виброкомплексами.

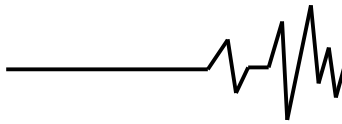
Система для расчета и оптимизации параметров содержит в себе следующие прецеденты (см. рис. 2.): ввод данных; анализировать; получить; оптимизация по электрическим и механическим характеристикам; получение результатов; получение отчета.

В качестве примера в таблицах 1 и 2 представлено детальное описание прецедентов «Расчет и оптимизация параметров системы» и «Оптимизация по механическим характеристикам». Аналогично описываются и остальные прецеденты.

Динамику поведения ПК представим в виде контекстной, DFD-диаграммы нулевого уровня, моделирующей информационные потоки между комплексом и внешними сущностями и отражающей главную цель программной системы (рис. 3). В контекстной диаграмме содержатся две внешние сущности: «Конструктор» – пользователь, непосредственно использующий данное программное изделие и «Технолог» конечный пользователь, получающий результаты расчетов в виде файла или видеограммы.



Рис. 3. Информационные потоки программного комплекса «Vibrosis»



**Таблиця 1**  
**Описание прецедента «Расчет и оптимизация параметров системы»**

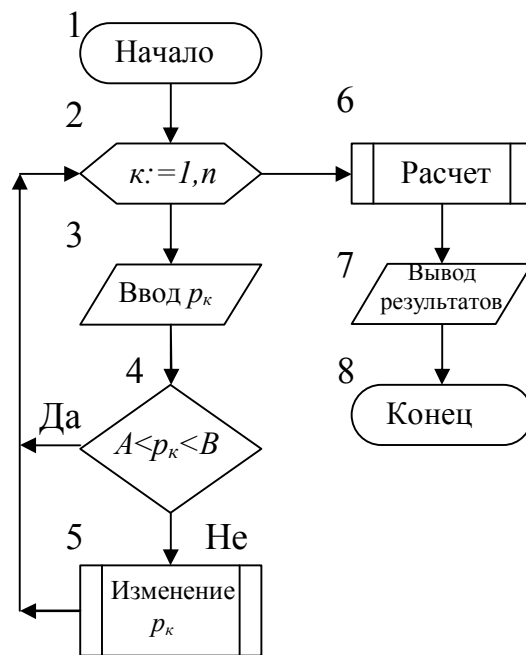
Основной исполнитель – ПК.
Заинтересованные лица и их требования: - ПК идентифицирует математическую модель расчета параметров системы управления до оптимизации и выдает исходные данные для получения результата.
Предусловия: - ПК проанализировал введенные данные и идентифицировал математическую модель.
Результаты (постусловия): - Выданы промежуточные результаты до оптимизации.
Основной успешный сценарий (или основной процесс) - ПК после анализа рассчитывает по математической модели оптимальные значения электрических и механических параметров системы и оптимальный ток.
Расширения (или альтернативные потоки). При вводе данных, не соответствующих формату их программного и логического описания: - ПК выдает соответствующее сообщение и осуществляет повторный ввод.

**Таблиця 2**  
**Описание прецедента «Оптимизация по механическим характеристикам»**

Основной исполнитель – Пользователь, ПК
Заинтересованные лица и их требования: - Пользователь хочет получить оптимальные значения механических характеристик системы управления; - ПК. Хочет показать оптимальные результаты по механическим характеристикам системы управления.
Предусловия: - ПК рассчитал по математической модели характеристики системы до оптимизации.
Результаты (постусловия): - получены оптимальные значения механических характеристик.
Основной успешный сценарий (или основной процесс): - ПК оптимизирует механические характеристики системы управления в соответствии с математической моделью оптимизации; - ПК выдает пользователю отчетную информацию о характеристиках системы; - ПК записывает в базу данных рассчитанные параметры.
Расширения (или альтернативные потоки) При невозможности оптимизировать модель:- ПК выдает сообщение о невозможности оптимизировать модель по заданному критерию.

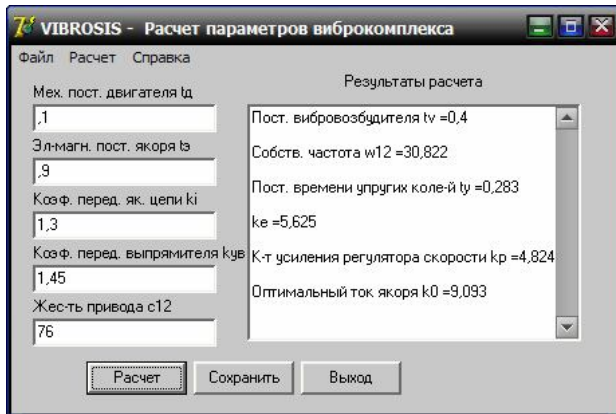
Из DFD-диаграммы (см. рис. 3) видно, что пользователь в диалоговом режиме вводит данные о двигателе ( $t_d$ ,  $t_3$ , и др.). ПК реагирует на это соответствующими сообщениями, а результаты расчетов направляются конечному пользователю. Последний анализирует полученные данные и при необходимости вносит исправления в расчет.

Практическая реализация вышеупомянутых диаграмм показана в виде принципиальной блок-схемы, представленной на рис.4.



**Рис. 4. Блок-схема программы**

Программа работает следующим образом. В цикле (блоки 2-5) пользователь вводит параметры электродвигателя (обозначение  $p_k$ ) которые в блоке 4 проходят логический контроль на соответствие заданным диапазонам изменения и при необходимости корректируются в блоке 5, о чем пользователю выдается соответствующее сообщение. Данные, прошедшие логический контроль, передаются в подпрограмму «Расчет», осуществляющую вычисления по формулам (1-12) математической модели. Результаты вычислений выводятся на экран и при необходимости сохраняются в файле. Интерфейс программы, написанный с помощью средства визуального программирования Delphi [9] показан на рис. 5.



**Рис. 5. Вид главной формы приложения с результатами расчета**

Время работы программы с учетом ввода данных составляет 3-4 мин. Вычисления в неавтоматизированном режиме с помощью микроалькулятора занимают около двух часов непрерывной работы квалифицированного расчетчика. Расчеты с использованием данной программы показали, что в диапазонах  $0,01 \leq t_d \leq 1$ ;  $0,1 \leq t_z \leq 1$ ;  $70 \leq c_{12} \leq 120$  расхождение с экспериментальными данными [1] составляет от 1% до 4%.

В дальнейшем программу можно встроить непосредственно в систему управления виброкомплексом для работы в реальном масштабе времени. Это позволит автоматически менять ток якоря двигателя в зависимости от текущего состояния величины остаточных напряжений в детали, что приведет к снижению энергоемкости процесса.

Другими словами, получая от датчиков системы управления текущее значение величины тока, программа может сравнивать его с оптимальным значением и в случае отклонения устанавливать оптимальную величину.

### Выводы

В результате проведенных исследований разработана математическая и информационная модели, а также программа, позволяющая оптимизировать параметры системы управления электродвигателем виброкомплекса. Время расчета параметров составляет 3-4 мин. В перспективе программу

можно использовать непосредственно в системе управления виброкомплексом в реальном масштабе времени.

### Литература

1. Дрыга А.И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении. Теория, исследования, технология / Дрыга А.И. – Краматорск: ДГМА, 2004. – 168 с.

2. Сердюк Л.И., Жигилий С.М., Костенко П.Н. Повышение эффективности работы управляемых вибрационных машин / Л.И. Сердюк, С.М. Жигилий, П.Н. Костенко // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. - № 2 – С. 48-51.

3. Дрыга А.И. Исследование структурных изменений в закаленной стали после вибрационной обработки / А.И. Дрыга, Б.А. Брусиловский // Вибрации в технике и технологиях. – Винница. 2003. - № 5. С. 3-5.

4. Дрыга А.И. К вопросу об оснащении виброкомплексами гибкого автоматизированного участка для механической обработки корпусных деталей паровых, газовых и гидравлических турбин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонНГТУ, 2003. – Вып. 25. С. 117-123.

5. Дрыга А.И. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритного корпуса статора гидрогенератора с применением широкодиапазонных виброкомплексов // Тяжелое машиностроение. М., 2003. - № 9. С. 37-39.

6. Искович–Лотоцкий Р.Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р.Д. Искович–Лотоцкий, И.Б. Матвеев, В.А. Крат. – К.: Техніка, 1982. 208 с.

7. Задорожний Н.А. Разработка систем управления электромеханических виброкомплексов с активным демпфирование колебаний / Н.А. Задорожний, А.И. Дрыга // Вибрации в технике и технологиях. – Винница. 2003. - № 5. С. 6-9.

8. Рамбо, Д. UML: Специальный справочник / Д. Рамбо, А. Якобсон, Г. Буч. – СПб.: Питер, 2002. – 656 с.

9. Фаронов В. Delphi 6. / В. Фаронов – СПб.: Питер, 2002. – 512 с.