

# Поддержка принятия решений при исследовании робастности систем управления в условиях интервальной неопределенности

А.В. Бондарев

Кафедра электроснабжения промышленных предприятий

Кумертауский филиал ОГУ

Кумертау, Россия

e-mail: bondarevav@kfosu.edu.ru

## Аннотация<sup>1</sup>

В данной статье рассматривается алгоритм поддержки принятия решений, позволяющий оценивать робастность сложных систем управления на этапе схмотехнического проектирования.

## 1. Введение

Качество принимаемых проектных решений во многом зависит от уровня достоверной информации о свойствах разрабатываемых измерительно-вычислительных систем. Исчерпывающая информация такого рода может быть получена при осуществлении разносторонних испытаний натуральных образцов. Однако существует целый ряд факторов, которые делают такой подход неэффективным. К ним относятся: высокая стоимость реальных макетов сложных устройств, необходимость использования специальной дорогостоящей измерительной аппаратуры, высокая опасность крупных аварий при оценке области безопасной работы мощных силовых приборов, а также неприемлемые временные затраты при проведении ресурсных испытаний. Все это привело к тому, что в настоящее время большое значение приобретают новые информационные технологии CAD/CAM/CAE, способные объединять все стадии разработки и производства в единый виртуальный процесс проектирования изделий (Virtual Product Development, VPD), который оперирует с общей, полностью цифровой моделью. Информационная среда VPD позволяет разрабатывать многовариантные конфигурации изделий на стадии концептуального проектирования, интегрировать все этапы рабочего проектирования, моделировать и тестировать основные фазы производственного процесса, начиная с гибких автоматизированных участков изготовления комплектующих изделий и кончая сборкой

компонент и созданием прототипа. В этой «непрерывной цепочке процессов» (process threads) наиболее слабым звеном является плохо формализуемый начальный этап проектирования, связанный с формированием концептуального ядра разрабатываемого изделия, в частности его схмотехнического облика. При этом особое значение приобретают такие информационные технологии, которые позволяют учитывать всю совокупность неопределенных факторов, влияющих на способность изделия сохранять свои характеристики в условиях заранее неизвестных внешних и внутренних возмущений.

## 2. Постановка задачи

Под робастностью мы будем понимать способность системы сохранять свои характеристики в заданных пределах при наличии возмущающих воздействий с неопределенными заранее свойствами. В отличие от задачи оценки чувствительности здесь приходится иметь дело с конечными отклонениями электрических параметров, которые по величине могут быть сопоставимы с их расчетными значениями. Данное обстоятельство определяет особенности предлагаемой модели, позволяющей оценивать робастность проектируемой системы управления.

Поскольку одним из аспектов процедуры проектирования является невозможность рассчитать поведение сложных систем во всех условиях применения и для всех режимов работы, то учитывается лишь то множество вариантов условий применения и режимов работы, при которых сложные системы в целом способны с определенной эффективностью выполнить поставленные задачи. Остальные варианты образуют множество нерасчетных условий функционирования, для которых параметры внешней среды и характеристики систем являются неопределенными. Указанные обстоятельства увеличивают степень неопределенности условий, в которых создаются новые системы. С другой стороны, достоверность выбора оптимального варианта, осуществляемого в условиях неопределенности, зависит от объема

---

Труды четвертой международной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 17 - 19 мая, Уфа, Россия, 2016

объективной информации относительно свойств разрабатываемых систем. Для уменьшения риска выбора неудовлетворительного варианта процедуре оценки должен предшествовать этап анализа свойств проектируемой системы. Причем объем проводимых исследований должен обеспечивать снижение неопределенности в оценке его свойств до уровня, позволяющего осуществить обоснованный отбор. Таким образом, совокупность анализируемых проектных альтернатив расширяется за счет экспериментов, которые могут быть осуществлены для увеличения объема достоверной информации о проектируемом комплексе, а также за счет возможных результатов подобных экспериментов, что увеличивает и без того высокую размерность задачи проектирования. Это обстоятельство определяет необходимость разработки соответствующих алгоритмов поддержки принятия решений (ППР) при проектировании сложных систем в условиях неопределенности.

### 3. Описание алгоритма ППР.

Формализация процедуры выбора оптимального облика и оптимального плана экспериментальных исследований в процессе схемотехнического проектирования сложных систем управления направлена на то, чтобы упорядочить действия проектировщика, выявить объективную природу его предпочтений и расширить на этой основе возможности в достоверной оценке предлагаемых вариантов. С этой целью разработана методика выбора оптимального варианта и оптимальной последовательности экспериментов, направленных на изучение свойств исследуемых вариантов. Операция выбора включает три характерных этапа.

Этап прогнозирования представляет собой исследовательский процесс, в результате которого формируются основные элементы математического описания, общие для всех этапов процедуры композиционного проектирования.

Множество  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_r\}$  заданий представляет собой совокупность требований, определяющих функциональное предназначение проектируемого изделия и многообразие условий его применения.

Множество  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  опорных вариантов построения изделия задает совокупность детализированных до определенного уровня технических решений, которые удовлетворяют ограничениям и рассматриваются как возможные способы выполнения заданий.

Критерием  $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p\}$  назовем такую оценочную функцию или определенную их совокупность, которая признается проектировщиком важной в отношении выполнения заданий изделия, является общей для всех опорных вариантов, отвечающих фиксированному уровню детализации

изделия, и не может быть представлена в виде ограничений.

Множество  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_q\}$  проектных параметров - это совокупность технических характеристик, однозначно описывающих данный опорный вариант построения изделия.

Множество  $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_s\}$  тактических параметров - это совокупность внешних по отношению к проектируемому элементу условий, непосредственно определяющих эффективность выполнения изделием поставленных заданий.

Введем также множество экспериментов  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ , направленных на устранение неопределенности в оценках опорных вариантов, и множество  $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m\}$  возможных результатов проведенных экспериментов. Для формализации неопределенных факторов используются дискретные и непрерывные характеристики, которые задаются в виде аддитивных, субаддитивных и супераддитивных мер введенных оценок. Для описания случайных величин используются функции распределения тактических параметров  $f(\Theta)$ , представляющие суждения проектировщика об относительном правдоподобии значений элементов множества  $\Theta$  при выборе соответствующего опорного варианта. В свою очередь, множеству  $\Gamma$  ставится в соответствие априорная оценка возможности их наступления в виде совокупности условных функций распределения  $g_i(\Gamma / \Theta)$ , выражающих суждения проектировщика о возможности получения данного результата  $\Gamma$  в процессе осуществления эксперимента  $Y_i$  при условии, что тактические параметры приняли значение  $\Theta$ . Для описания нечетко заданных неопределенных параметров вводятся аналогичные априорные и условные функции принадлежности. Итог этапа прогнозирования - формирование совокупности оценочных функций, отражающих субъективное мнение проектировщика о соответствии опорных вариантов предъявляемым к ним требованиям, которое образовалось в результате анализа возможных исходов экспериментов при учете неопределенных факторов:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i(Z, X_i, \Theta, \Gamma, Y_j), \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (1)$$

Этап оценки включает в себя математическую обработку априорных характеристик с целью получения апостериорных зависимостей  $\varphi(\Theta / \Gamma, Y)$  и  $\varphi(\Gamma, Y)$ . Далее определяются ожидаемые значения оценочных функций применительно ко всем выявленным вариантам построения изделия

$$\varepsilon(Z, X, \Gamma, Y) = \int_{\Omega} \varepsilon(Z, X, \Theta, \Gamma, Y) \varphi(\Theta / \Gamma, Y) d\Theta, \quad (2)$$

на основе которых формируется приоритетное множество опорных вариантов:

$$\varepsilon(Z, \Gamma, Y) = \text{extr} \varepsilon(Z, X, \Gamma, Y), X_i \in X \quad (3)$$

и вычисляются его оценки:

$$\varepsilon(Z, Y) = \int_G \varepsilon(Z, \Gamma, Y) \rho(\Gamma/Y) d\Gamma \quad (4)$$

Полученные значения оценочных функций используются для выбора оптимального эксперимента, обеспечивающего наилучшую ожидаемую величину этого критерия:

$$\varepsilon^*(Z) = \text{extr} \varepsilon(Z, Y) \text{ по всем } Y_j \in Y. \quad (5)$$

Этап принятия решения - завершающая стадия операции выбора, на которой осуществляется найденный оптимальный эксперимент  $Y_j^*$  и фиксируется его результат  $\Gamma^*$ . С учетом осуществления оптимального эксперимента определяется опорный вариант построения системы управления, для которого ожидаемое значение критерия будет максимальным

$$\varepsilon(Z, X_i^*, \Gamma^*, Y_j^*) = \text{extr} \varepsilon(Z, X_i, \Gamma^*, Y_j^*), X_i \in X \quad (6)$$

С учетом изложенных соображений опишем обобщенный алгоритм поддержки принятия решений при выборе оптимального схмотехнического варианта системы применительно к двум наиболее характерным типам шкал случайных оценочных функций - дискретным и непрерывным. Данный алгоритм базируется на байесовой теории решений и теории полезности Неймана-Моргенштерна.

Изложенные концепции получили свое выражение в общей схеме многоэтапного процесса формирования облика сложной системы (см. рисунки 1 и 2). С помощью блока 1 организован цикл, реализующий последовательность операций выбора. На каждом шаге этого цикла в блоке 2 формируется множество опорных вариантов построения. Блок 3 предназначен для определения множества оценочных функций, которые, по мнению проектировщика, устанавливают степень соответствия исследуемых вариантов требованиям к системе. Задача четвертого блока состоит в выявлении множества возможных экспериментов. Пятый блок устанавливает тип шкалы оценочных функций в соответствии с приведенными ранее соображениями. Дальнейшее движение по алгоритму зависит от типа выбранной шкалы. Одно направление предусматривает обработку дискретных величин, другое - непрерывных.

В случае дискретной шкалы в блоке семь формируются массивы исходных данных. Далее на основе суждений проектировщика заполняются массивы возможных значений тактических параметров и ожидаемых значений оценочных функций применительно к каждому выявленному опорному варианту, определенному эксперименту, предполагаемому результату эксперимента и

фиксированным значениям тактических параметров. Заполнение оставшихся массивов - априорного и условного распределений вероятностей и функций принадлежности - осуществляется на основе преданализа возможных исходов предполагаемых экспериментов.

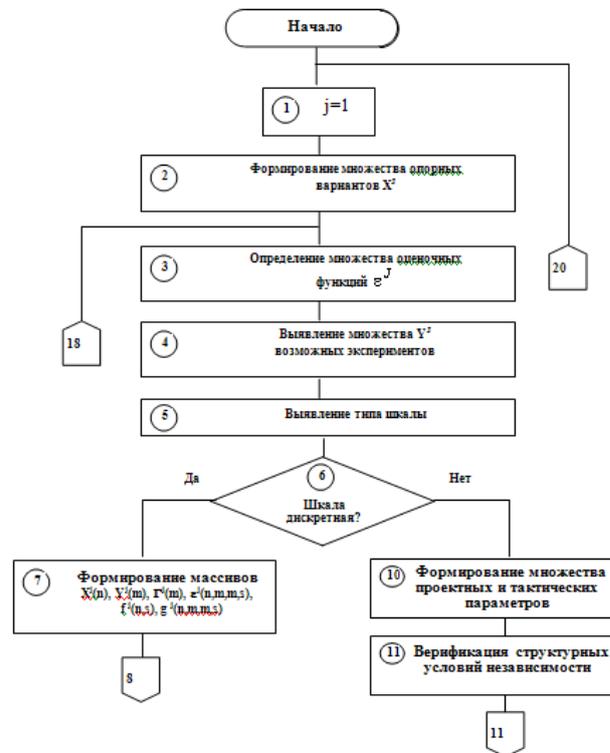


Рис. 1. Общая схема многоэтапной процедуры формирования облика БРЭС

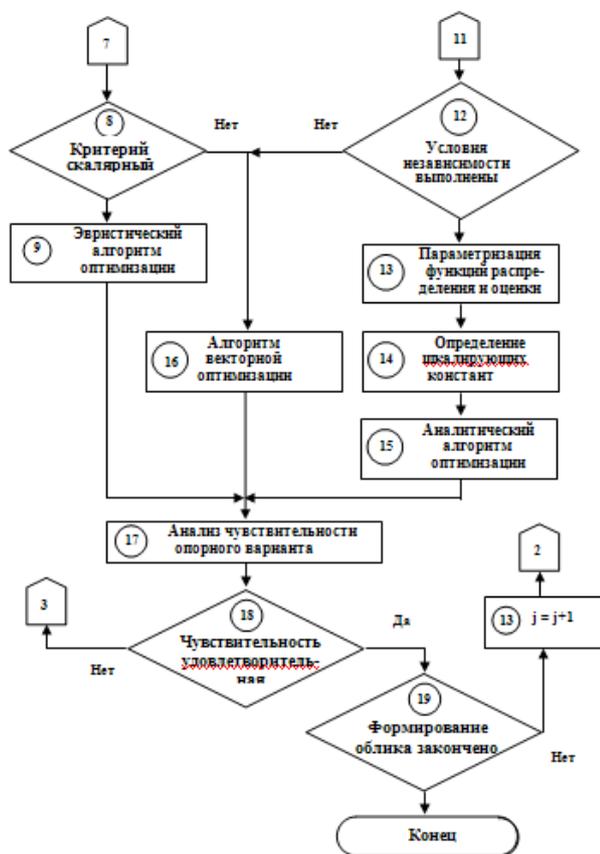
После формирования массивов исходных данных оценивается число компонентов критерия. Если критерий скалярный, то выбор оптимального опорного варианта осуществляется в блоке 9.

При наличии информации, достаточной для построения непрерывных шкал, выполнение процедуры формирования облика осуществляется с помощью блока 10. Проверка (верификация) условий независимости осуществляется в блоке 11. В настоящее время известен значительный набор условий независимости критериев и соответствующих методов проверки их выполнения.

Параметризация (восстановление функциональной зависимости) одномерных оценочных функций производится в блоке 13.

Принцип восстановления предусматривает выявление возможного интервала  $[\pi_i^0; \pi_i^*]$  изменения параметра  $\pi_i$  и последующее разбиение этого интервала, а также всех появляющихся в дальнейшем на такие подынтервалы, чтобы средняя точка  $\pi_i^c$  соответствовала ожидаемому среднему значению оценочной функции на концах интервала.

Определение шкалирующих констант в осуществляется с помощью алгоритма, содержащегося в блоке 14. После выявления характера зависимости оценочных функций от проектных параметров их оптимальные значения находятся в блоке 15.



**Рис. 2. Общая схема многоэтапной процедуры формирования облика БРЭС (продолжение)**

Если декомпозиция векторного критерия оказывается невозможной, то выбор оптимального опорного варианта осуществляется в блоке 16.

Важное место в процедуре эвристического выбора занимает изучение достоверности полученного результата. Поскольку исходные данные, сформированные на основе субъективных оценок, допускают варьирование в определенном интервале, то лишь достаточно нечувствительные решения могут быть представлены для реализации.

Принцип непротиворечия качественной информации предопределяет, что любой параметр может изменяться в пределах, не приводящих к изменению характера решения. Проверка указанного принципа производится в блоке 17. В этом блоке в зависимости от характера задачи выбора осуществляется исследование влияния вариации оценок правдоподобия различных случайных и неопределенных величин, шкалирующих констант, вероятностных норм процедуры параметризации на результат выбора. Если вариация указанных величин в пределах, не противоречащих качественной

информации проектировщика, не приводит к изменению результата выбора, то он считается малочувствительным. В противном случае необходимо вернуться к блоку 3.

Изложенный алгоритм ППР является основой для разработки программного модуля при схемотехническом проектировании сложных систем в условиях дефицита достоверной информации.

#### 4. Описание модели сложной системы в конечных приращениях.

В качестве исходного описания рассматривается эквивалентная схема системы, заданная в виде электрического многополюсника [4]. Представляя элементы электронных устройств, входящих в состав исследуемых систем, своими физическими моделями или схемами замещения, состоящими из пассивных двухполюсников (линейных и нелинейных, резистивных и реактивных), а также зависимых источников тока и напряжения, подробные схемы которых в конечных приращениях приведены в [1,4]. В соответствии с принятой классификацией [3] рассмотрим один из типовых режимов работы, например, квазилинейный режим малого сигнала при расчете во временной области.

Расчет систем во временной области заключается в определении вида переходных процессов, возникающих под действием источников переменных сигналов и импульсных последовательностей. В результате подобного расчета находится время, необходимое для перевода схемы из одного статического режима в другой, или время, за которое токи и напряжения достигают заданного уровня. Часто представляет интерес форма переходного процесса. Развитие электромагнитных процессов во времени определяется характером изменения напряжений на емкостях и токов в индуктивностях. В связи с этим указанные величины называют переменными состояниями электронной схемы. В свою очередь математическая модель электронной схемы, представленная в виде нормальной или канонической системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно переменных состояния, называется системой уравнений состояния. В тех случаях, когда уровни переменных сигналов в схеме значительно меньше уровней постоянных токов и напряжений статического режима, анализ переходных процессов проводится в линеаризованной схеме, где все нелинейные элементы заменяются их малосигнальными моделями. При этом система уравнений состояния также становится линейной. Чтобы получить такую модель исследуемой электронной схемы, необходимо сформировать гибридный базис, содержащий переменные состояния, и исключить все остальные переменные, относящиеся к резистивным ветвям эквивалентной схемы.

При решении данной задачи предполагается, что топология эквивалентной схемы удовлетворяет следующим двум ограничениям:

- отсутствуют независимые контура, целиком состоящие из емкостей, из источников тока, либо из емкостей и источников тока;

- отсутствуют независимые сечения, целиком состоящие из индуктивностей, из источников напряжения, либо из индуктивностей и источников напряжения.

Реактивные элементы эквивалентной схемы - емкости и индуктивности - выделяются в особые ветви. В результате оставшаяся часть эквивалентной схемы будет представлять собой линейный резистивный многополюсник, включающий резисторы, зависимые и независимые источники. Емкости, параметрическое описание которых соответствует z-ветвям, должны быть отнесены к ребрам, что всегда может быть обеспечено при выполнении предположения об отсутствии главных емкостных контуров. Аналогично этому индуктивности должны быть отнесены к хордам. Чтобы обеспечить сформулированные требования нумерация ветвей должна начинаться с емкостей, а завершаться - индуктивностями.

Таким образом, множество токов и напряжений для всех ветвей эквивалентной электрической схемы разбивается на характерные подмножества:

$$I = [I_C^m; I_R^m; I_L^X; I_R^X]^T; U = [U_L^X; U_R^X; U_C^m; U_R^m]^T. \quad (7)$$

Этому разбиению соответствует следующая форма представления топологических уравнений в конечных приращениях:

$$\begin{bmatrix} E & 0 & D_I & D_{II} \\ 0 & E & D_{III} & D_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_C^P & \Delta I_R^P & \Delta I_L^X & \Delta I_R^X \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} E & 0 & B_I & B_{II} \\ 0 & E & B_{III} & B_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_L^X & \Delta U_R^X & \Delta U_C^P & \Delta U_R^P \end{bmatrix} = 0$$

(8)

В результате образуется декомпозированные совокупности топологических уравнений:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_C^P \\ \Delta I_R^P \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_I & D_{II} \\ D_{III} & D_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_L^X \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_L^X \\ \Delta U_R^X \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_I & B_{II} \\ B_{III} & B_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta U_R^P \end{bmatrix} \quad (9)$$

На основе этих уравнений сформируем гибридные векторы, включающие зависимые и независимые переменные как реактивных, так и резистивных ветвей:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta U_L^X \\ \Delta I_C^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_I & 0 \\ 0 & -D_I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} -B_{II} & 0 \\ 0 & -D_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta U_R^X \\ \Delta I_R^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_{III} & 0 \\ 0 & -D_{III} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} -B_{IV} & 0 \\ 0 & -D_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

Дополним эти топологические уравнения соответственно параметрическими уравнениями реактивных и резистивных ветвей, представленными в следующей форме [1]:

$$\begin{cases} \Delta I_C^P = C \cdot \frac{d\Delta U_C^P}{dt} + \Delta C \cdot \frac{d\Delta U_C^P}{dt} + J_{HE3}^C \\ \Delta U_L^X = L \cdot \frac{d\Delta I_L^X}{dt} + \Delta L \cdot \frac{d\Delta I_L^X}{dt} + E_{HE3}^L \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta I_R^P = Y \cdot \Delta U_R^P + \Delta Y \cdot \Delta U_R^P + J_{HE3}^R \\ \Delta U_R^X = R \cdot \Delta I_R^X + \Delta R \cdot \Delta I_R^X + E_{HE3}^R \end{cases} \quad (12)$$

Поскольку левые части второй системы уравнений (10) и совокупности (12) равны, приравняем их правые части и в результате преобразования получим:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} - N \quad (13)$$

где

$$M = \begin{bmatrix} -B_{IV} & \mathcal{K} \\ \mathcal{E} & -D_{IV} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -B_{IV} & 0 \\ 0 & -D_{IV} \end{bmatrix};$$

$$N = \begin{bmatrix} -B_{IV} & \mathcal{K} \\ \mathcal{E} & -D_{IV} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E_{HE3}^R \\ J_{HE3}^R \end{bmatrix}.$$

Левые части первой системы уравнений (10) и выражения (11) равны, следовательно, приравняв их правые части, найдем:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathcal{E} \\ \mathcal{E} & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{HE3}^L \\ J_{HE3}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_I & 0 \\ 0 & -D_I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -B_{IV} & 0 \\ 0 & -D_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} \quad (14)$$

где  $\mathcal{E} = \text{diag}\{L_k + \Delta L_k\}$  - матрица индуктивностей  
 $k = 1, n_{IL}^X$ ;  $\mathcal{E} = \text{diag}\{C_k + \Delta C_k\}$  - матрица емкостей  
 $k = 1, n_{IC}^P$ .

Следовательно, модель электрического многополюсника во временной области в режиме

малого сигнала можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & \mathcal{E} \\ \mathcal{E} & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_I & 0 \\ 0 & -D_I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} -B_{IV} & 0 \\ 0 & -D_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_{HE3}^L \\ J_{HE3}^C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} - N \end{cases} \quad (15)$$

Учитывая интервальный характер полученной модели, в данном алгоритме используется метод Эйлера для интегрирования дифференциальных уравнений и метод конфигураций (метод Хука-Дживса), который является методом нулевого порядка и не требует вычисления интервальных производных при решении системы нелинейных алгебраических уравнений.

Шаг 1. Полагаем  $t_0 = 0$  и  $l = 0$ .

Шаг 2. Используя правила интервальных вычислений [3], находим

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix}_{t_l} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathcal{E} \\ \mathcal{E} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -B_I & 0 \\ 0 & -D_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix}_{t_l} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & \mathcal{E} \\ \mathcal{E} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -B_{IV} & 0 \\ 0 & -D_{IV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_H^P \\ \Delta I_H^X \end{bmatrix}_{t_l} - \\ &- \begin{bmatrix} 0 & \mathcal{E} \\ \mathcal{E} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_{HE3}^L \\ J_{HE3}^C \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Шаг 3. Находим интервальное расширение вектора

$$\begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix}_{t_l+\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix}_{t_l} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix}_{t_l} \times \Delta, \text{ где } \Delta -$$

шаг интегрирования.

Шаг 4. Решаем нелинейную интервальную систему:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_C^P \\ \Delta I_L^X \end{bmatrix} - N \text{ для момента } t_{l+1} = t_l + \Delta.$$

Шаг 5. Полагаем  $l = l + 1$ ,  $t_l = t_l + \Delta$ .

Шаг 6. Процесс закончен? Если «да», идти к пункту 7; иначе – к пункту 2.

Шаг 7. Конец.

### 3. Заключение

Изложенный в данной статье алгоритм ППР позволяет существенно сократить вычислительные затраты, поскольку не требует многократных расчетов для различных сочетаний варьируемых параметров, и может быть использован для проектирования сложных систем.

### Список используемых источников

1. Бондарев А.В. “Вычислительная процедура исследования чувствительности временных характеристик энергетических комплексов”. *Системы управления и информационные технологии*, 2008; (32):21 - 24.
2. Чуа Л.О., Лин Пен-Мин “Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы”. – Москва, 1980.
3. Сигорский В.П., Петренко А.И. “Алгоритмы анализа электронных схем”. Москва, 1976.
4. Ефанов В.Н., Бондарев А.В. “Исследование робастности электронных устройств измерительно-вычислительных систем”. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2010; 4:51 - 58.
5. Шарый С.П. “Конечномерный интервальный анализ”. – <http://www.ns.c.ru/interval>