

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-591-603

ECONOMICAL MANAGEMENT OF DIESEL GENERATOR SETS BY MEANS OF MATLAB DIGITAL TECHNOLOGIES

S. O. Baryshnikov, V. V. Sakharov, A. A. Chertkov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A numerical algorithm for optimizing the technological processes of diesel generator sets operating on various grades of fuel, implemented by means of CVX-technologies, is considered. Traditional algorithms have generally proven to be positive, but can be problematic for optimization due to the large number of variables and the nonlinearity of the model. In addition, due to the huge computational load, they can “stall” or become damaged when used to search for non-standard designs, such as asymmetric D-optimal and large-dimensional spatial structures. It is noted that an alternative to them is calculations in the CVX format, which are widespread and available for solving convex optimization problems. However, their application for the control of technological processes of energy saving in autonomous electric power complexes in transport is still limited. Based on the tools of the CVX package in MATLAB, using their usefulness and flexibility in comparison with traditional optimization methods, this paper proposes technical solutions aimed at developing energy-saving technologies for energy complexes of autonomous systems in the context of digital transformation. The application of energy saving management methods is presented in this study on the example of fuel consumption management by a group of diesel generators with different consumption characteristics of primary engines, for which optimal modes have been obtained at various options of active power consumption by the network. An example of calculating optimal modes in parallel operation of five DGA with CVX program codes is given, confirming the correctness of the proposed solutions. It is shown that the use of CVX programs in MATLAB demonstrates their usefulness and flexibility in comparison with traditional algorithms in the statistics of searching for various types of optimal approximate constructions by convex criterion for nonlinear models.

Keywords: energy network, flow characteristics, economy mode, polynomial approximation, CVX technologies, Euclidean norm, structure of calculations.

For citation:

Baryshnikov, Sergey O., Vladimir V. Sakharov, and Alexander A. Chertkov. “Economical management of diesel generator sets by means of MATLAB digital technologies.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.4 (2024): 591–603. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-591-603.

УДК 621.398.04

ЭКОНОМИЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАТЛАВ

С. О. Барышников, В. В. Сахаров, А. А. Чертков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен численный алгоритм оптимизации технологических процессов дизель-генераторных агрегатов, работающих на различных сортах топлива, реализованный средствами CVX-технологий. Традиционные алгоритмы в целом положительно зарекомендовали себя, но могут быть проблематичными для оптимизации из-за большого количества переменных и нелинейности модели. Кроме того, из-за огромной вычислительной нагрузки, они могут «застопориться» или повредиться при использовании в процессе поиска нестандартных конструкций, таких как асимметричные D-оптимальные и пространственные конструкции большой размерности. Отмечается, что альтернативой им служат вычисления в CVX-формате, которые широко распространены и доступны для решения задач выпуклой оптимизации. Однако их применение для управления технологическими процессами энергосбережения в автономных электроэнергетических

комплексах на транспорте пока ограничено. На базе инструментов пакета CVX в MATLAB, используя их полезность и гибкость по сравнению с традиционными способами оптимизации, в данной работе предложены технические решения, направленные на развитие энергосберегающих технологий энергетических комплексов автономных систем в условиях цифровой трансформации. Применение способов оптимизации энергосбережения представлено в данном исследовании на примере управления расходом топлива группой дизель-генераторных агрегатов с различными расходными характеристиками первичных двигателей, для которых получены четыре варианта оптимальных режимов потребляемой сетью активной мощности. Приведен пример расчета оптимальных режимов при параллельной работе пяти дизель-генераторных агрегатов с программными кодами CVX, подтверждающий корректность предложенных решений. Показано, что использование программ CVX в MATLAB демонстрирует их полезность и гибкость по сравнению с традиционными алгоритмами в статистике поиска различных типов оптимальных приближенных конструкций по выпуклому критерию для нелинейных моделей.

Ключевые слова: энергетическая сеть, расходные характеристики, экономичный режим, аппроксимация полиномом, CVX-технологии, евклидова норма, структура вычислений.

Для цитирования:

Барышников С. О. Экономичное управление дизель-генераторными агрегатами с помощью средств цифровых технологий MATLAB / С. О. Барышников, В. В. Сахаров, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 591–603. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-591-603.

Введение (Introduction)

Применение современных цифровых технологий в управлении энергосбережением на водном транспорте определяет необходимость использования способов выпуклой оптимизации и инструментов CVX для выполнения вычислений на качественно новом уровне. Выпуклая оптимизация является особым видом моделей математической оптимизации, к которому относятся задачи наименьших квадратов и линейного программирования. Методы и средства выпуклой оптимизации находят все большее практическое применение в таких наукоемких областях знаний, как автоматизация и интеллектуальное управление, оценка и обработка сигналов, связь и сети, проектирование электронных схем, анализ и моделирование данных, статистика и финансы. Применение методов выпуклой оптимизации для решения систем линейных матричных неравенств (LMI) определяет в настоящее время область разработки прорывных технологий в структурах синтеза регуляторов выхода и состояния асимптотически устойчивых динамических систем [1]. Выпуклая оптимизация также нашла применение в комбинаторной оптимизации, где она используется для нахождения ограничений, вызванных условиями эксплуатации динамических систем и внешними возмущениями.

Алгоритмический подход является практическим способом поиска оптимальных решений. Существует множество типов алгоритмов для вычисления оптимальных конструкций, на основе различных предположений. В частности, многие алгоритмы являются детерминированными, для которых повторные запуски моделей с одними и теми же входными данными приводят к одному и тому же конечному результату. Среди детерминированных алгоритмов и математических методов оптимизации особая роль отводится линейному и квадратичному программированию, относящемуся к классу задач, решаемых программными средствами CVX, что позволяет на качественно новом уровне численно оценивать проектные результаты. Решение в CVX обеспечивается группой солверов (решателей), предназначенных для минимизации конструкций, представляющих собой класс линейных матричных неравенств с оценкой результатов по различным нормам (Евклидовой, Фробениуса, квадратичным функционалам и др.). Задачи выпуклой оптимизации должны быть записаны в определенных формах, прежде чем они могут быть решены CVX.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Важной проблемой энергосбережения при групповом управлении дизель-генераторными агрегатами (ДГА) является выбор числа агрегатов, работающих на различных сортах топлива, а также необходимость получения моделей расходных характеристик при изменении сортов

топлива. По полученным результатам измерений необходимо рассчитать коэффициенты полиномов модели с минимальной погрешностью, что обеспечивается применением CVX-технологий. Предлагаемый способ расчета экономичных режимов генераторных агрегатов при параллельной работе, базирующийся на применении технологий CVX-приложений, позволяет существенно расширить класс решаемых задач и обеспечить гибкость выполнения многочисленных ограничений в процессе диспетчеризации энергосистем [2], [3].

Расчет экономичных режимов при параллельной работе ДГА целесообразно выполнять в определенной последовательности. Сначала необходимо получить параметры моделей расходных характеристик, для чего предложена программа и выполнены вычисления по технологиям CVX, затем, исходя из необходимости перевода отдельных ДГА на новые сорта топлива, на основе результатов измерений, следует внести коррекцию в исходные данные для обработки цифровых массивов. Для ДГА с идентичными расходными характеристиками рекомендуется оценивать чувствительность настройки параметров к внешним возмущениям, что позволит повысить качество управления. Оценка экономичных режимов работы распределенных ДГА приводится к классу задач выпуклого программирования, что дает возможность использовать инструменты CVX для получения численных решений при изменении сортов топлива [4].

Рассмотрим примеры, связанные с применением метода наименьших квадратов для определения аналитических зависимостей расходных характеристик ДГА, параметры которых оценим на основе экспериментальных данных.

В общем виде функциональные зависимости расхода топлива i -м объектом (ДГА) аппроксимируются полиномами вида [5]:

$$F_i(P_i) = a_{i1}P_i^n + a_{i2}P_i^{n-1} + a_{i(n-1)}P_i + a_{ik}, \quad (1)$$

где a_{ik} — постоянные коэффициенты, подлежащие оценке;

P_i — мощность i -го дизель-генераторного агрегата;

$k = 1, 2, \dots, n$ — порядковый номер степени полинома.

Заметим, что полином (1) является линейным относительно коэффициентов, поэтому для их оценки применим метод наименьших квадратов (МНК). С этой целью будем использовать пакет CVX, представляющий собой набор инструментов для решения задач выпуклой оптимизации, который идеально подходит для цифровой обработки алгоритмов, составленных в терминах наименьших квадратов (линейной регрессии) [6]. Методом наименьших квадратов оценивают вектор состояния $x \in R^n$, который минимизирует норму $\|Ax - b\|_2$, где матрица размера $A \in R^{m \times n}$ является прямоугольной, а ее ранг при $m \geq n$ $\text{rank}(A) = n$.

Сформируем данные и приведем решение задачи оценки коэффициентов полиномов расходных характеристик ДГА в эксперименте с применением структуры CVX по следующей схеме:

```
cvx _begin
variable x(n)
minimize(norm(A*x-b,i))
subject to
cvx _end
```

Здесь CVX_begin создает условия для ввода расчетных данных в структуру CVX, состоящих из объявленных в ней переменных, ограничений, целевой функции и данных, составляющих специфику конкретной задачи после автоматической проверки средствами пакета ее принадлежности к задачам выпуклого программирования. В строке *variable x(n)* переменная x объявляется оптимизирующей с указанием размерности n . По умолчанию, все искомые переменные в CVX должны быть объявлены до начала использования в целевой функции или системе ограничений.

Операция минимизации `minimize (norm(A*x - b, i))`, согласно синтаксису MATLAB, задается нормой `norm(A*x - b, i)`, которая является целевой функцией, где $i = 1$ выбирается для решения задач линейного программирования ($i = 2$ — квадратичного, $i = \text{Inf}$ — оценки решения

по норме П. Л. Чебышева и др.). Далее следуют ограничения, при соблюдении которых процесс оптимизируется. Вычисления завершаются строкой `cvx_end`, после чего оптимальные оценки выводятся в форме сегмента кода, пригодного для дальнейшего применения в других операторах среды MATLAB. В простой задаче по методу наименьших квадратов существует не так много вариантов для ошибки, но если, например, сформулировать ее в терминах функции MATLAB `maximize(norm(A*x-b))`, то в этом случае среда CVX выдаст ошибку с требованием соблюдения операции вогнутости целевой функции. Экспериментальные данные в единицах расхода условного топлива (у. т.), необходимые для оценки коэффициентов полиномов расходных характеристик, приведены в следующей таблице:

P_1 , кВт	20	25	30	35	40	45	50
F_1 , у. т.	92,00	108,75	127,00	146,75	168,00	190,75	215,00
P_2 , кВт	35	40	45	50	55	60	65
F_2 , у. т.	99,125	112,00	125,625	140,00	155,125	171,00	187,6250
P_3 , кВт	65	70	75	80	85	90	95
F_3 , у. т.	174,0	185,5	197,5	210,0	223,0	236,5	250,5
P_4 , кВт	45	50	55	60	65	70	75
F_4 , у. т.	117,8	130,0	142,8	156,2	170,2	184,8	200,0
P_5 , кВт	35	40	45	35	40	45	50
F_5 , у. т.	96.975	106.600	116.775	127.500	138.775	150,600	162.975

Будем полагать, что приведенные табличные данные хорошо аппроксимируются полиномами второго порядка [7], [8]:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= a_{11}P_1^2 + a_{12}P_1 + a_{13}; \\
 F_2 &= a_{21}P_2^2 + a_{22}P_2 + a_{23}; \\
 F_3 &= a_{31}P_3^2 + a_{32}P_3 + a_{33}; \\
 F_4 &= a_{41}P_4^2 + a_{42}P_4 + a_{43}; \\
 F_5 &= a_{51}P_5^2 + a_{52}P_5 + a_{53},
 \end{aligned} \tag{2}$$

содержащими по три неизвестных коэффициента, численные значения которых необходимо оценить. Следовательно, вектор оцениваемых коэффициентов будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= [a_{11} \ a_{12} \ a_{13}]; \\
 x_2 &= [a_{21} \ a_{22} \ a_{23}]; \\
 x_3 &= [a_{31} \ a_{32} \ a_{33}]; \\
 x_4 &= [a_{41} \ a_{42} \ a_{43}]; \\
 x_5 &= [a_{51} \ a_{52} \ a_{53}].
 \end{aligned} \tag{3}$$

Оценку коэффициентов полиномов расходных характеристик с применением метода наименьших квадратов [9], реализуемого с помощью CVX, будем выполнять последовательно для каждого из пяти дизель-генераторных агрегатов, начиная с первого. С этой целью, на основе данных эксперимента (см. таблицу), сформируем, согласно синтаксису MATLAB, векторы P_i и F_i :

% ДГА-1

```
>> P1=linspace(20,50,7)';
```

```
>> F1=[92.00 108.75 127.00 146.75 168.00 190.75 215.00]';
```

где оператор `linspace(X1, X2, N)` генерирует вектор-строки из $N = 7$ равноудаленных точек между $X1 = 20$ и $X2 = 50$.

На основе построенных векторов P_1 и F_1 выполним подготовку данных для применения МНК, выразив матрицы A и b , согласно синтаксису MATLAB, соответствующими векторами:

% Подготовка данных:

```
>> b=F1;
```

```
>> A=[P1.^2 P1 ones(7,1)];
```

Далее введем норму $\text{norm}(A - b*x, 2)$. Для решения используем CVX-модель согласно структуре текстового алгоритма:

```
>> cvx_begin
```

```
>> variable x(3,1)
```

```
>> minimize(norm(A*x-b,2))
```

```
>> cvx_end
```

Результатом выполнения данного алгоритма являются численные значения коэффициентов расходной характеристики для первого дизель-генераторного агрегата:

$$x_1 = [0.0300 \quad 2.0000 \quad 40.0000],$$

где $a_{11} = 0.0300$; $a_{12} = 2.0000$; $a_{13} = 40.0000$.

Аналогично применим рассмотренную процедуру для оценки коэффициентов расходных характеристик остальных ДГА. В итоге получим следующие результаты:

$$x1 = [0.0300 \quad 2.0000 \quad 40.0000];$$

$$x2 = [0.0150 \quad 1.4500 \quad 30.0000];$$

$$x3 = [0.0100 \quad 0.9500 \quad 70.0000];$$

$$x4 = [0.0120 \quad 1.3000 \quad 35.0000];$$

$$x5 = [0.0110 \quad 1.1000 \quad 45.0000].$$

Для проверки правильности решения рассмотренной задачи по оценке параметров расходных характеристик достаточно по известным из эксперимента значениям векторов $P_1, P_2, \dots, P_5$ мощностей ДГА и найденным значениям векторов $x_1, x_2, \dots, x_5$ искомым коэффициентам расходных характеристик вида (1) получить численные значения векторов $F_1, F_2, \dots, F_5$, соответствующие исходным значениям расхода топлива (см. таблицу). Этой цели служит следующий код проверки:

```
>> F=[A1*x1' A2*x2' A3*x3' A4*x4' A5*x5'];
```

где $A_1, A_2, \dots, A_5$ — матрицы в кодах среды MATLAB, представленные следующими выражениями:

$$A1=[P1.^2 \quad P1 \quad \text{ones}(7,1)];$$

$$A2=[P2.^2 \quad P2 \quad \text{ones}(7,1)];$$

$$A3=[P3.^2 \quad P3 \quad \text{ones}(7,1)];$$

$$A4=[P4.^2 \quad P4 \quad \text{ones}(7,1)];$$

$$A5=[P5.^2 \quad P5 \quad \text{ones}(7,1)].$$

Результатом проверки являются численные значения матрицы:

F =

92.0000	99.1250	174.0000	117.8000	71.4000
108.7500	112.0000	185.5000	130.0000	79.3750
127.0000	125.6250	197.5000	142.8000	87.9000
146.7500	140.0000	210.0000	156.2000	96.9750
168.0000	155.1250	223.0000	170.2000	106.6000
190.7500	171.0000	236.5000	184.8000	116.7750
215.0000	187.6250	250.5000	200.0000	127.5000

столбцы которой соответствуют данным эксперимента (см. строки $F_1, F_2, \dots, F_5$ в таблице). Следовательно, задача оценки искомым коэффициентов решена корректно.

Таким образом, расходные характеристики рассматриваемых ДГА будут представлены в виде следующих аналитических зависимостей:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0,030P_1^2 + 2,00P_1 + 40; \\ F_2 &= 0,015P_2^2 + 1,45P_2 + 30; \\ F_3 &= 0,010P_3^2 + 0,95P_3 + 70; \\ F_4 &= 0,012P_4^2 + 1,30P_4 + 35; \\ F_5 &= 0,011P_5^2 + 1,10P_5 + 45. \end{aligned} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что пока CVX считывает спецификацию задачи, выполняется анализ вводимых кодов, и при обнаружении нарушений правил выпуклого программирования (например, недопустимом использовании правила композиции или его недопустимом ограничении) генерируется сообщение об ошибке [10], [11]. Когда проверка в MATLAB достигает команды `cvx_end`, завершается преобразование спецификации CVX в каноническую форму и вызывается базовый решатель ядра для ее цифровой обработки.

Предполагается, что структура модели расходных характеристик не изменяется, представляя собой полиномы второго порядка при качественной подгонке коэффициентов к эксперименту. Это позволяет предложить для расчетов экономических режимов нелинейную модель, состоящую из аддитивных составляющих расходных характеристик ДГА. Тогда решение состоит в минимизации критерия качества [12]:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i(P_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где n — число работающих ДГА;

P_i — мощность i -го генератора электроэнергии.

Чтобы обеспечить потребности электроэнергии сети, необходимо ввести в модель следующее ограничение-равенство, согласно которому суммарная мощность ДГА должна быть равна мощности $P(t)$ сети:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

где n — число параллельно работающих ДГА.

Используя уравнение (5), получим

$$J(k, t) = \min \sum_{i=1}^k f_i(P_i(t)), \quad k = 1, 2, \dots, n$$

путем вариации мощности ДГА:

$$0 \leq P_1(t) \leq P_{1\max};$$

$$0 \leq P_2(t) \leq P_{2\max};$$

...

$$0 \leq P_i(t) \leq P_{i\max}.$$

где $P_{i\max}$ — максимально допустимая мощность i -го агрегата.

Минимизация критерия (8) с соблюдением ограничения-равенства (6) является операцией, где число работающих ДГА может задаваться пользователем (вахтенным) в различных сочетаниях, число которых для пяти ДГА равно 32. Выполнение таких расчетов обеспечивается в цикле `cvx_begin – cvx_end` путем введения требуемой комбинации ограничений [13], [14].

Для задач экономичного управления группой дизель-генераторных агрегатов, использующих разные сорта топлива и их смеси, необходимо проводить эксперименты для определения параметров моделей их расходных характеристик, получая на их основе численные значения оценок экономичного режима каждого агрегата в составе группы ДГА. Для решения таких задач, которые можно отнести к классу задач выпуклого программирования, предлагается использовать инструмент CVX с применением методов численной оптимизации, хорошо адаптированный к решению задач оптимального распределения ресурсов.

Отличительной особенностью этого инструментария является простота структуры вычислительных алгоритмов и их устойчивость. На практике используют различные алгоритмы CVX-технологий, однако в данном случае для экономичного управления ДГА будем использовать структуру `cvx_begin – cvx_end`, с помощью которой достигаются минимальные затраты на топливо и высокая энергетическая эффективность ДГА.

Определим последовательность операций для реализации данного способа.

1. Выполняется мониторинг группы ДГА, для которых необходим переход на новый сорт топлива; расход топлива представляют в условных единицах; корректируют систему ограничений, отвечающих эксплуатационным требованиям [5].

2. В структуру `cvx_begin – cvx_end` с учетом нагрузки сети вводят состав параллельно работающих и находящихся в «резерве» ДГА.

3. С применением инструментов CVX рассчитывают экономичные режимы работы ДГА и автоматически устанавливают их параметры на агрегатах путем воздействия на регуляторы первичных двигателей.

Способ цифровой оптимизации, ориентированный на применение инструментов CVX, по содержанию алгоритма может быть отнесен к классу проблем распределения ограниченных ресурсов. Ресурсы следует распределить по процессам так, чтобы обеспечивался минимум расхода топлива, необходимого для получения единицы электроэнергии сети (4). Способ инвариантен к виду ресурсов и эффективен в тех случаях, когда многокритериальная проблема приведена к критерию одной размерности (одному виду ресурсов), например, представленному в денежных оценках.

Результаты (Results)

Основной результат состоит в получении способа экономичного управления ДГА с различными расходными характеристиками. Для демонстрации работы данного способа составим файл `sah024aa.m` и выполним расчеты с целью управления группой судовых ДГА с максимально генерируемой мощностью, равной 350 кВт. Воспользовавшись расходными характеристиками (4), рассмотрим фрагмент файла с подготовленными данными для вычислений в формате CVX:

```
% sah024aa.m Оптимизация параллельной работы пяти ДГА.
% Вектор коэффициентов полиномов расходных характеристик
a=[0.030 0.015 0.010 0.012 0.011];
f=[2 1.45 0.95 1.3 1.1];
Aeq=[1 1 1 1 1]; A=[0 0 0 0 0]; B=0;
Xmin=zeros(5,1); Xmax=[50 65 95 75 65]';
Q=diag(a);
%=====
% CVX
Beq=[0 20 40 60 80 100 120 40 160 180 205 225 250 270 290 310 336 350];
v=size(Beq); v=v(2);
xx=[]; J=[];
for i=1:v;
n=5; %r=0;
```

```
r=[40+30+70+55+45];
cvx_begin
variable x(n)
minimize(norm(Q*x-f'));
subject to
Aeq*x==Beq(i);
x>=Xmin;
x<=Xmax;
%x(1)==0;
%x(2)==0;
%x(3)==0;
%x(4)==0;
%x(5)==0;
cvx_end
xx=[xx x];
J=[J x'*Q*x+f*x+r];
end
xx;
J;
% Результаты расчета
W=[xx;sum(xx);J*1.0e-03]
plot(sum(xx),xx,sum(xx),J*1.0e-01,'*',sum(xx),J*1.0e-01,'LineWidth',2),grid
```

На основе результатов моделирования оптимальных режимов пяти ДГА (рис. 1), параллельно работающих на различных сортах топлива, получены следующие результаты (представлены выборочно):

50.0000	50.0000	50.0000	...	50.0000	50.0000	50.0000
48.0462	52.5690	56.1991	...	50.0000	50.0000	50.0000
0.0000	0.0000	3.9479	...	55.0000	81.0000	95.0000
32.3638	39.4308	45.1027	...	75.0000	75.0000	75.0000
9.5900	18.0002	24.7503	...	65.0000	65.0000	65.0000
140.0000	160.0000	180.0000	...	310.0000	336.0000	350.0000
0.5855	0.6260	0.6648	...	0.9381	0.9982	1.0361

В представленных результатах первые пять строк — численные значения мощности ДГА1–ДГА5.

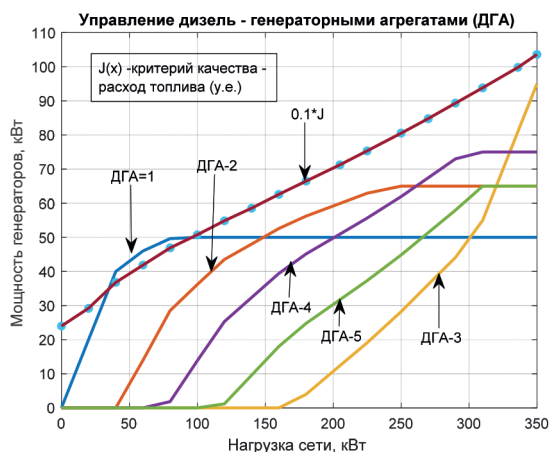


Рис. 1. Оптимальное управление режимами ДГА при параллельной работе на различных сортах топлива

В шестой строке приведены значения мощности, потребляемой сетью (равна сумме столбца пяти ДГА), в седьмой строке — значения критерия на соответствующей мощности сети. Режимы определены по столбцам. Там же построена кривая критерия качества J энергосбережения на всем диапазоне изменения мощности сети.

Основное преимущество структуры `svx_begin – svx_end` состоит в том, что могут быть оперативно рассчитаны любые другие режимы, состоящие из выбранной группы ДГА, генерирующей электроэнергию в сеть. Таких комбинаций для группы, состоящей из пяти агрегатов, будет 36. При этом, если их число — два и более, выполняются операции по минимизации расхода топлива. На рис. 2 представлены четыре варианта экономичных режимов при параллельной работе ДГА. Приведем фрагменты решений, характеризующие качество оценки.

Первый вариант состава группы работающих ДГА: ДГА-1, ДГА-3, ДГА-4.

Система ограничений:

`%x(1)==0; x(2)==0; %x(3)==0; %x(4)==0; x(5)==0;`

Фрагмент решения $W(:,8:11)$

```
ans =
50.0000    50.0000    50.0000    50.0000
         0         0         0         0
28.1147    39.9182    55.0000    80.0000
61.8853    70.0818    75.0000    75.0000
         0         0         0         0
140.0000   160.0000   180.0000   205.0000
0.5760     0.6189     0.6625     0.7200
```

Видно, что при нагрузке сети 205 кВт мощность генераторов составляет

$$205 = \text{sum}([50 \ 0 \ 80 \ 75 \ 0]).$$

По приведенным числовым значениям легко определяются характеристики, относящиеся к различным агрегатам.

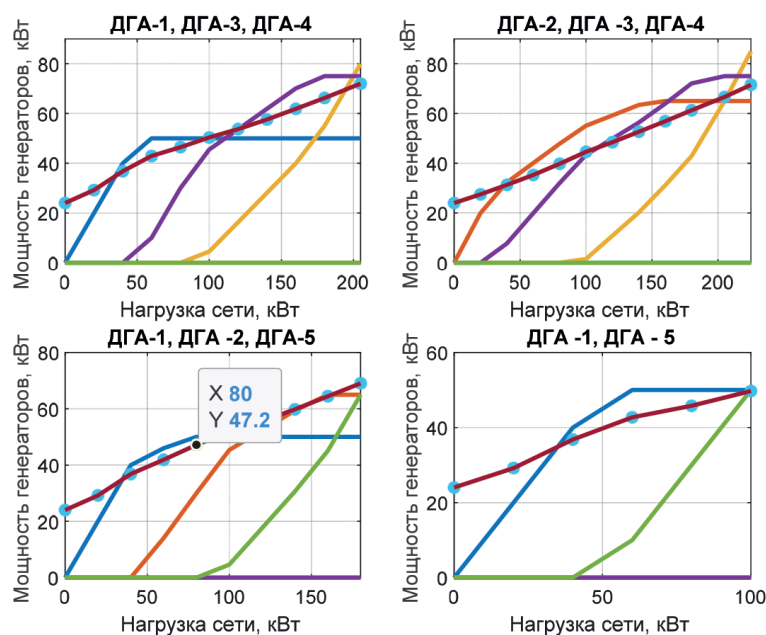


Рис. 2. Оптимальное управление ДГА при различном составе агрегатов

Второй вариант состава группы работающих ДГА: ДГА-1, ДГА-2, ДГА-5.

Система ограничений:

`%x(1)==0; % x(2)==0; x(3)==0; x(4)==0; % x(5)==0;`

Фрагмент решения W(:,7:10):

```
ans =
    50.0000    50.0000    50.0000    50.0000
    52.3712    59.3643    65.0000    65.0000
         0         0         0         0
         0         0         0         0
    17.6288    30.6357    45.0000    65.0000
   120.0000   140.0000   160.0000   180.0000
    0.5549    0.5980    0.6444    0.6906
```

Максимально допустимая нагрузка сети составляет 180 кВт. Мощность генераторов:

$$180 = \text{sum}([50 \ 65 \ 0 \ 0 \ 65]).$$

Простой способ численной оптимизации технологических процессов реализован средствами CVX.

Третий вариант состава группы работающих ДГА: ДГА-2, ДГА-3, ДГА-4.

Система ограничений

```
x(1)==0; % x(2)==0; % x(3)==0; % x(4)==0; x(5)==0;
```

Фрагмент решения W(:,9:12):

```
ans =
         0         0         0         0
    65.0000    65.0000    65.0000    65.0000
    31.0654    42.8667    65.0000    85.0000
    63.9347    72.1333    75.0000    75.0000
         0         0         0         0
   160.0000   180.0000   205.0000   225.0000
    0.5690    0.6129    0.6666    0.7156
```

Максимально допустимая нагрузка сети составляет 225 кВт. Мощность генераторов

$$225 = \text{sum}([0 \ 65 \ 85 \ 75 \ 0]).$$

Система ограничений обеспечивает надежную процедуру поиска экономичных режимов.

Четвертый вариант состава группы работающих ДГА: ДГА-1, ДГА-5.

Система ограничений:

```
% x(1)==0; x(2)==0; x(3)==0; x(4)==0; % x(5)==0;
```

Фрагмент решения W(:,3:6):

```
ans =
    40.0000    50.0000    50.0000    50.0000
         0         0         0         0
         0         0         0         0
         0         0         0         0
     0.0000    10.0000    30.0000    50.0000
     40.00    60.0000    80.0000   100.0000
    0.3680    0.4271    0.4579    0.4975
```

Максимально допустимая нагрузка сети составляет 100 кВт. Мощность генераторов с учетом ограничений:

$$100 = \text{sum}([50 \ 0 \ 0 \ 0 \ 50]).$$

Расчеты показывают, что с изменением генерируемой в сеть мощности наклоны расходных характеристик изменяются вследствие выхода на максимально допустимые режимы ДГА, которые

работают на дешевых сортах топлива (см. рис. 1). При мощности $P \geq 248$ кВт мощность ДГА-5 ограничивается до 65 кВт. В режиме $P \geq 275$ кВт на максимально допустимый режим нагрузки 95 кВт выходит ДГА-3. Если $P \geq 329$ кВт, то максимально нагруженными оказываются одновременно четыре ДГА. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, показал, что сеть допустимо нагружать до 270 кВт. Средства CVX обеспечивают надежную защиту агрегатов от перегрузок во всем диапазоне нагрузок сети за счет работы в цикле структуры `cvx_begin – cvx_end`.

Обсуждение (Discussion)

В работе предложен способ экономичного управления ДГА с использованием CVX-технологий для решения задач выпуклой оптимизации и параметрической идентификации моделей расходных характеристик. Применение новых способов и средств цифровой обработки сигналов на базе структур CVX, ориентированных на решение задач выпуклого программирования, является необходимым условием совершенствования и развития технологий моделирования и ресурсосбережения в условиях внедрения цифры в производство.

Отмечается, что важным направлением цифровизации является возможность применения алгоритмов на основе CVX-технологий для нахождения многоступенчатых или многокритериальных оптимальных проектов.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Структуры CVX применены для поиска энергоэффективных режимов многотопливных генераторов электроэнергии с различными расходными характеристиками при их параллельной работе.
2. Предложен алгоритм и программа подгонки параметров модели расходных характеристик к эксперименту, который может быть применен на судах морского и речного транспорта.
3. Определена норма минимизации в структуре CVX для поиска переменных состояния и введены ограничения, связанные с отключением объектов от системы.
4. Выполнены расчеты, подтверждающие корректность предложенных решений и их эффективность.
5. Выполнен анализ качества оптимизации потребляемой сетью мощности по критерию минимизации суммарной стоимости электроэнергии и подтверждена обоснованность предложенных решений.
6. Представленные результаты исследований ориентированы на использование ключевых преимуществ CVX-вычислительных программ для оценки экономичных режимов, разработку способа и алгоритма экономии топлива и энергии средствами современных цифровых технологий на объектах водного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Синтез оптимальных регуляторов судовых систем на основе матричных неравенств / С. О. Барышников, Н. М. Вихров, В. В. Сахаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1085–1095. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1085-1095.
2. Chatzivasileiadis S. Optimization in Modern Power Systems. DTU Course 31765. Lecture Notes / S. Chatzivasileiadis. — Technical University of Denmark (DTU), 2018. — 42 p.
3. Andersson G. Power System Analysis. Power Flow Analysis. Fault Analysis. Power System Dynamics and Stability. Lecture 227-0526-00, ITET ETH Zurich / G. Andersson. — ETH Zurich, 2012. — 185 p.
4. Zhu J. Optimization of Power System Operation / J. Zhu. — 2nd Edition. — Wiley-IEEE Press, 2015. — 664 p.

5. *Abou El Ela A. A.* Optimal power flow using differential evolution algorithm / A. A. Abou El Ela, M. A. Abido, S. R. Spea // *Electrical Engineering*. — 2009. — Vol. 91. — Pp. 69–78. DOI: 10.1007/s00202-009-0116-z.
6. *Davuluri S.* Decentralized economic dispatch for radial electric distribution systems: thesis / S. Davuluri. — Massachusetts Institute of Technology, 2019. — 90 p.
7. *Sallam A. A.* Electric Distribution Systems / A. A. Salla, O. P. Malik. — 2nd edition — Wiley-IEEE Press, 2018. — 624 p.
8. *Park C.* Comparative review and discussion on P2P electricity trading / C. Park, T. Yong // *Energy Procedia*. — 2017. — Vol. 128. — Pp. 3–9. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.003.
9. *Малафеев А. В.* Алгоритм оптимизации распределения активной мощности между электростанциями промышленного предприятия и узлами связи с энергосистемой с учетом потерь в распределительной сети / А. В. Малафеев, В. А. Игуменцев, А. В. Хламова // *Промышленная энергетика*. — 2011. — № 9. — С. 16–21.
10. *Горелов С. В.* Автоматизация расчётов режимов перетоков активной мощности в электроэнергетических системах / С. В. Горелов, С. О. Хомутов, И. А. Поляков, Ю. М. Денчик; под. ред. В. П. Горелова, В. Г. Сальникова. — Новосибирск.: Изд-во Сиб. гос. ун-та водного транспорта, 2016. — 120 с.
11. *Grant M. C.* The CVX Users' Guide. Release 2.1 / M. C. Grant, S. P. Boyd. — CVX Research, Inc., 2018. — 99 p.
12. *Chibanga T.* Applications of the Inverse LQR Problem to a Wind Energy Conversion System / T. Chibanga. — The University of Minnesota, 2016. — 58 p.
13. *Saadat H.* Solutions Manual / H. Saadat. — McGraw-Hill, Inc., 2016. — 285 p.
14. *Горелов С. В.* Энергоснабжение стационарных и мобильных объектов / С. В. Горелов, О. А. Князев [и др.]. — Москва – Берлин : Директ-Медиа, 2015. — 239 с.

REFERENCES

1. Baryshnikov, Sergey O., Nikolai M. Vikhrov, and Vladimir V. Sakharov. "Synthesis of ship systems optimal regulators based on matrix inequalities." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1085–1095. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1085-1095.
2. Chatzivasileiadis, Spyros. *Optimization in Modern Power Systems. DTU Course 31765. Lecture Notes*. Technical University of Denmark (DTU), 2018.
3. Andersson, Goran. *Power System Analysis. Power Flow Analysis. Fault Analysis. Power System Dynamics and Stability. Lecture 227-0526-00, ITET ETH Zurich*. ETH Zurich, 2012.
4. Zhu, Jizhong. *Optimization of Power System Operation*. 2nd Edition. Wiley-IEEE Press, 2015.
5. Abou El Ela, A. A., M. A. Abido, and S. R. Spea. "Optimal power flow using differential evolution algorithm." *Electrical Engineering* 91 (2009): 69–78. DOI: 10.1007/s00202-009-0116-z.
6. Davuluri, Sruthi. *Decentralized economic dispatch for radial electric distribution systems*. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2019.
7. Sallam Abdelhay A., and Om P. Malik. *Electric Distribution Systems*. 2nd edition Wiley-IEEE Press, 2018.
8. Park, Chankook, and Taeseok Yong. "Comparative review and discussion on P2P electricity trading." *Energy Procedia* 128 (2017): 3–9. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.003.
9. Malafeev, A.V., V.A. Igumenshchev, and A.V. Khlamova. "Algoritm optimizatsii raspredeleniya aktivnoi moshchnosti mezhdru elektrostantsiyami promyshlennogo predpriyatiya i uzlamy svyazi s energosistemoy s uchetom poter' v raspredelitel'noi seti." *Promyshlennaya energetika* 9 (2011): 16–21.
10. Gorelov, S.V., S.O. Khomutov, I.A. Polyakov, and Yu.M. Denchik. *Avtomatizatsiya raschetov rezhimov peretokov aktivnoi moshchnosti v elektroenergeticheskikh sistemakh*. Edited by V.P. Gorelov, V.G. Sal'nikov. Novosibirsk.: Izd-vo Sib. gos. un-ta vodn. transp., 2016.
11. Grant, Michael C., and Stephen P. Boyd. *The CVX Users' Guide*. Release 2.1. CVX Research, Inc., 2018.
12. Chibanga, Tsungai. *Applications of the Inverse LQR Problem to a Wind Energy Conversion System*. The University of Minnesota, 2016.
13. Saadat, H. *Solutions Manual*. McGraw-Hill, Inc., 2016.
14. Gorelov, S.V., O.A. Knyazev, E.Yu. Kisilitsin, V.I. Kryukov, and S.G. Kulikov. *Energосnabzhenie statsionarnykh i mobil'nykh ob'ektov*. M-Berlin: Direkt-Media, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —

доктор технических наук, профессор
ФБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru

Сахаров Владимир Васильевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: _saharov_@rambler.ru,
SaharovVV@gumrf.ru

Чертков Александр Александрович —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7,
e-mail: chertkov51@mail.ru,
chertkovaa@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergey O. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rector@gumrf.ru

Sakharov, Vladimir V. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: _saharov_@rambler.ru,
SaharovVV@gumrf.ru

Chertkov, Alexander A. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chertkov51@mail.ru,
chertkovaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 7 августа 2024 г.

Received: August 7, 2024.