

УДК 621.438:519.863

Н.М. Онуфрієва, магістр,  
Г.А. Баласанян, д-р техн. наук, проф.,  
Одес. нац. політехн. ун-т

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КОГЕНЕРАЦІЇ НА БАЗІ ГАЗОВОЇ МІКРОТУРБИНИ

*Н.М. Онуфрієва, Г.А. Баласанян. Моделювання системи когенерації на базі газової мікротурбіни.* Математичне моделювання дозволяє аналізувати характеристики когенераційної системи із застосуванням мікрогазотурбінної установки. За допомогою аналізу властивостей математичної моделі є можливість розрахувати оптимальні параметри для одержання максимальної роботи когенераційної установки, а також передбачити зміну параметрів роботи мікротурбіни при збільшенні початкового тиску.

*Ключові слова:* математичне моделювання, оптимізація робочих процесів, когенераційна установка, газова мікротурбіна.

*Н.Н. Онуфриева, Г.А. Баласанян. Моделирование системы когенерации на базе газовой микротурбины.* Математическое моделирование позволяет анализировать характеристики когенерационной системы с применением микрогазотурбинной установки. С помощью анализа свойств математической модели представляется возможным рассчитать оптимальные параметры для получения максимальной работы когенерационной установки, а также предусмотреть изменение параметров работы микротурбины при увеличении начального давления.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, оптимизация рабочих процессов, когенерационная установка, газовая микротурбина.

*N.N. Onufrieva, G.A. Balasanyan. Modeling of cogeneration systems based on gas microturbine.* Mathematical modeling allows us to analyze characteristics of the cogeneration system using gas microturbine plant. Through the analysis of the properties of the mathematical model it is possible to calculate the optimum parameters for obtaining the maximum of the CHP, and to predict the change of the parameters of the microturbine with increased initial pressure.

*Keywords:* mathematical modeling, optimization of working procedures, cogeneration plant, gas microturbine.

У комунальній енергетиці України на виробництво теплоти витрачається в рік більше 8,0 млн т у.п., у тому числі 98,7 % природного газу й рідкого палива [1]. Ці дані дають підставу думати, що підвищення ефективності використання органічного палива є найважливішим актуальним завданням. Але у кожному конкретному випадку постає проблема вибору схеми й параметрів використовуваного типу теплоперетворюючої установки. В останні роки істотний інтерес викликають когенераційні теплоенергетичні установки, які включені до циклу виробництва теплоти для цілей теплопостачання з одночасним отриманням електричної енергії.

У когенераційних установках двигуном для привода електрогенератора можуть використовуватись газопоршневі машини, що працюють на природному газі, і газотурбінні установки (ГТУ). У кожному конкретному випадку основним інструментом вирішення проблеми вибору схеми й параметрів типу теплоенергетичних установок повинні бути математичне моделювання й оптимізація робочих процесів, що протікають у них [2].

Мікротурбіни є одним з найсучасніших видів енергогенеруючого обладнання, що перевершує існуючі типи генераторів за сукупністю споживчих властивостей: екологічності, ефективності, економічності і надійності. Можливість використання широкого спектра палива з різними характеристиками складу робить мікротурбіни незамінними у вирішенні завдань з вироблення енергії з відходів виробництва і життєдіяльності людини.

Основою успіху техніко-економічних досліджень теплоенергетичних установок, що базуються на проведенні чисельних експериментів, є наявність математичних моделей, для створення яких необхідно умовно виділити такі дві частини: створення детальних математичних моделей окремих елементів установки й ефективної моделі установки в цілому [3].

Один з варіантів теплової схеми системи теплопостачання в загальному вигляді містить газову мікротурбину Т, компресор К, камеру згорання КЗ, регенератор, бак-акумулятор БА, котел-утилізатор КУ, водогрійний котел ВК, бойлер гарячого водопостачання БГВП, бойлер опалення БО, споживач гарячого водопостачання ГВП, систему опалення СО та насоси — насос опалення НО, мережевий насос МН, насос котла утилізатора НКУ, насос бака-акумулятора НБА (рис. 1).

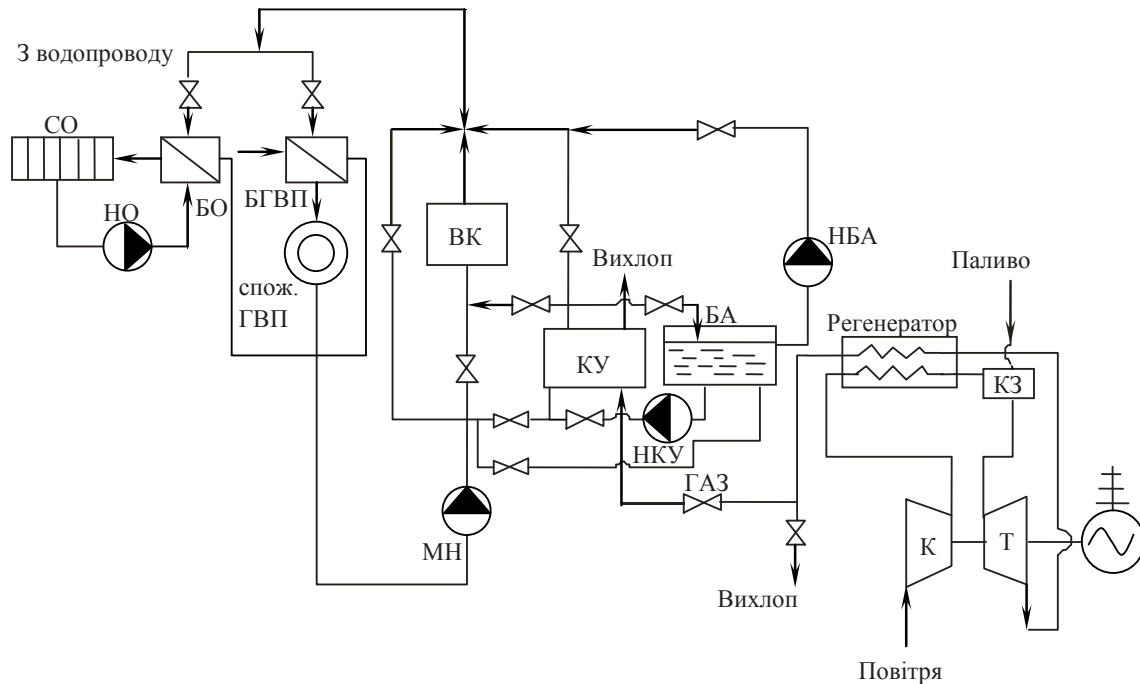


Рис. 1. Теплова схема системи когенерації на базі газової мікротурбіни

Математичне моделювання газової мікротурбінної установки (ГмТУ) проводиться з метою визначення оптимального ступеня підвищення тиску  $\pi$  при стисканні, а також для визначення параметрів і характеристик робочого процесу, основних показників ГмТУ, відповідних до оптимальної величини  $\pi$ .

Всі розрахунки зазвичай ведуться за питомими величинами, віднесеними до одного кілограма сухого повітря, що надійшло на стиск в компресор ГмТУ.

За допомогою розробленої програми отримано основні параметри мікротурбіни: коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ , витрата газу на мікротурбину  $Q$ , коефіцієнт корисної дії  $\eta$  та коефіцієнт використання палива  $K_{вп}$  при змінному початковому тиску та постійній температурі (рис. 2.).

Найменші витрати газу на мікротурбину будуть при  $P_0 = 4,5$  бар. Коефіцієнт корисної дії мікротурбіни також є найвищим при тиску, що дорівнює 4,5 бар.

Автономна робота системи енергозабезпечення (СЕ) відповідає режиму експлуатації когенераційної установки за електричним графіком навантаження, при якому виконується умова рівності миттєвих значень споживаної і генерованої в системі електричних потужностей,

$$N^{\text{спож}}(\tau) = N^{\text{ген}}(\tau).$$

Задачу узгодження графіків електричного і теплового навантажень розглянемо для найбільш характерного режиму роботи СЕ, при якому теплове навантаження споживача  $Q^{\text{спож}}$  розмірне з кількістю утилізованого  $Q^{\text{ут}}$  і додатково одержаного тепла від водогрійного котла  $Q^{\text{вк}}$ ,

$$Q^{\text{спож}}(\tau) \approx Q^{\text{ут}}(\tau) + Q^{\text{вк}}(\tau).$$

Нерівність лівої і правої частин виразу призводить до виникнення небалансу тепла в системі, величина якого від деякого початкового моменту часу  $\tau_0$  до поточного моменту  $\tau_{\text{пот}}$  складає

$$\Delta Q_{\tau_0, \tau_{\text{пор}}} = \int_{\tau_0}^{\tau_{\text{пор}}} [Q^{\text{ут}}(\tau) + Q^{\text{БК}}(\tau) - Q^{\text{спож}}(\tau)] \cdot \alpha \tau,$$

де  $\alpha \tau$  — диференціал першого порядку за часом.

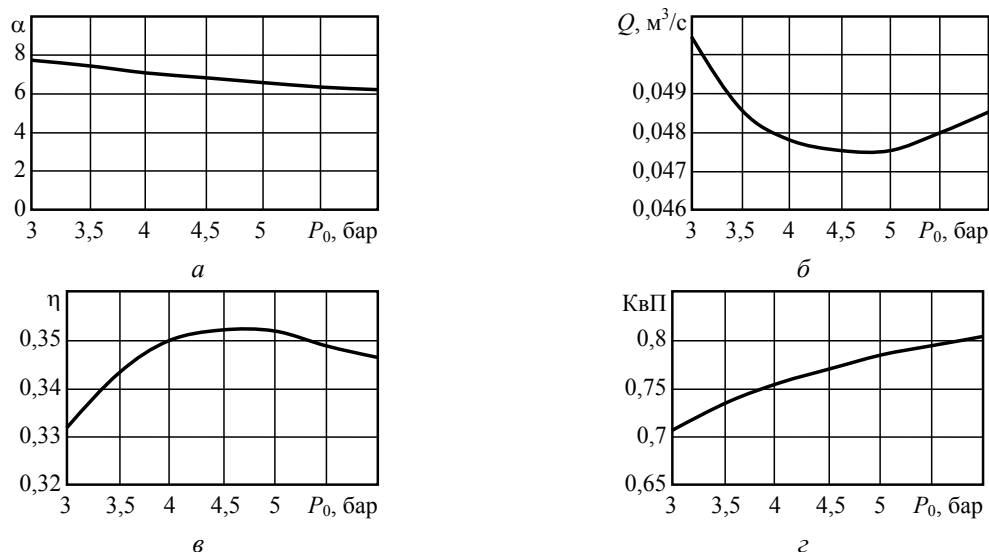


Рис. 2. Залежність параметрів мікротурбіни: коефіцієнт надлишку повітря (а), витрати газу на ГТУ (б), коефіцієнт корисної дії (в), коефіцієнт використання палива (г) від початкового тиску,  $P_0$

При позитивному значенні небалансу ( $\Delta Q_{\tau_0, \tau_{\text{пор}}} > 0$ ) відбувається підвищення температури мережної води на виході  $t_{\text{МВ}}^{\text{вих}}(\tau)$  і вході  $t_{\text{МВ}}^{\text{вх}}(\tau)$  когенераційної установки.

При негативному значенні небалансу ( $\Delta Q_{\tau_0, \tau_{\text{пор}}} < 0$ ) відбувається відповідне зниження температури мережної води, що викликає дефіцит теплової потужності в системі.

Для вирішення даного завдання в СЕ на базі газової мікротурбіни (з урахуванням її потужності) доцільніше використовувати:

— зміну теплової потужності водогрійного котла, що забезпечує додатковим теплом,  $Q^{\text{БК}}(\tau)$ ;

— ефект акумуляції тепла, який залежно від максимальної величини теплового небалансу в системі  $\Delta Q_{\text{max}}$  може бути реалізований на основі акумулюючої здатності елементів самої СЕ і захищаючих будівельних конструкцій споруд споживача або бака-акумулятора відповідної місткості.

Як критерій оптимізації режимів навантаження СЕ вибираються експлуатаційні затрати на виробництво необхідних видів енергетичної продукції, приведені до певного інтервалу часу (години, доби),

$$\sum_{i=0}^{23} Z_i = \sum_{i=0}^{23} (N_i^{\text{ген}} C_i^{\text{ел}} + \Delta N_i^{\text{пок}} \Pi_i^{\text{ел}} - \Delta N_i^{\text{прод}} \Pi_i^{\text{ел}} + Q_i^{\text{ут}} C_i^{\text{теп}} + Q_i^{\text{БК}} C_i^{\text{БК}}),$$

де  $N_i^{\text{ген}}$  — середньогодинна електрична потужність, що генерується, кВт;

$\Delta N_i^{\text{куп}}$ ,  $\Delta N_i^{\text{прод}}$  — середньогодинне електричне навантаження, що купується з енергосистеми та продається до неї, відповідно, кВт;

$C_i^{\text{ел}}$  — середньогодинна вартість електроенергії від когенераційної установки, грн/кВт·год;

$\Pi_{\text{куп}}^{\text{ел}}$ ,  $\Pi_{\text{прод}}^{\text{ел}}$  — тарифи на електроенергію, що купується і продається до мережі, відповідно, грн/кВт·год;

$Q_i^{\text{ут}}$ ,  $Q_i^{\text{БК}}$  — середньогодинна утилізована теплова потужність когенераційної установки і водогрійного котла, кВт;

$C_i^{\text{теп}}$ ,  $C_i^{\text{БК}}$  — середньогодинні вартості утилізованої теплової потужності когенераційної установки і водогрійного котла, відповідно, грн/кВт · год.

Результатом розв'язання задачі оптимізації є добовий графік навантажень когенераційної установки, який забезпечує мінімум вказаних витрат.

З математичної точки зору задача оптимізації може бути розглянута як задача пошуку екстремуму функції багатьох змінних (по 24 змінні — відповідні середньогодинні електричні та теплові навантаження  $N_i$ ,  $Q_i$ ,  $Q_i^{\text{БК}}$ ,  $i = \overline{0,23}$ ) з урахуванням обмежень і граничних умов, які накладаються на систему і змінні, що оптимізуються [4].

Враховуючи характер залежності між змінними, задача оптимізації відноситься до класу задач нелінійного програмування і в загальному вигляді може бути записана як

$$\sum_{i=0}^{23} Z_i(N_i^{\text{ген}}, Q_i^{\text{ут}}, Q_i^{\text{БК}}) \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} Z_0 = f(N_0^{\text{ген}}, Q_0^{\text{ут}}, Q_0^{\text{БК}}); \\ \dots; \\ Z_{23} = f(N_{23}^{\text{ген}}, Q_{23}^{\text{ут}}, Q_{23}^{\text{БК}}), \end{cases}$$

$$\begin{cases} N_{i\min} \leq N_i^{\text{ген}} \leq N_{i\max}; \\ Q_{i\min}^{\text{ут}} \leq Q_i^{\text{ут}} \leq Q_{i\max}^{\text{ут}}; \\ Q_{i\min}^{\text{дол}} \leq Q_i^{\text{дол}} \leq Q_{i\max}^{\text{дол}}; \\ i = \overline{0,23}, \end{cases}$$

де перша складова — цільова функція, друга — система обмежень (погодинних), третя — система граничних умов;

$N_{i\min}$ ,  $N_{i\max}$  — мінімально та максимально припустимі значення середньогодинних електричних навантажень, відповідно;

$Q_{i\min}^{\text{ут}}$ ,  $Q_{i\max}^{\text{ут}}$ ,  $Q_{i\min}^{\text{БК}}$ ,  $Q_{i\max}^{\text{БК}}$  — мінімально та максимально припустимі значення середньогодинних навантажень утилізованого тепла та теплової потужності додаткового джерела тепла, відповідно.

Функціональна залежність між сумарними середньогодинними витратами  $\sum_{i=0}^{23} Z_i$  і середньогодинними електричними  $N_i^{\text{ген}}$  та тепловими  $Q_i^{\text{ут}}$  навантаженнями в явному вигляді одержана бути не може внаслідок складності методики розрахунку цих показників, тому як інструмент для розв'язання задачі використовувався пакет MS Excel, що дозволило компактно запрограмувати методику розрахунку та виконати багатомірну оптимізацію з урахуванням обмежень і граничних умов в системі [5].

Проведено оптимізацію графіків добового навантаження установки газової мікротурбіни, що дозволило обрати режими, які забезпечують максимальну економічну ефективність її використання за будь-яких умов роботи.

Годинні теплові навантаження значно перевищують кількість утилізованої теплоти від газової мікротурбіни (мікротурбіна забезпечує потребу у теплі на 30...40 %), тому покриття різниці здійснюється за рахунок опалювальної котельні (рис. 3).

Якщо буде забезпечена можливість продажу залишків електроенергії до мережі (робота за тепловим графіком навантаження), то це значно підвищить кількість утилізованого тепла від газової мікротурбіни навантаження.

Таким чином, розроблена методика і програма оптимізації можуть бути використані для щодобового планування погодинного електричного і теплового навантаження установки.

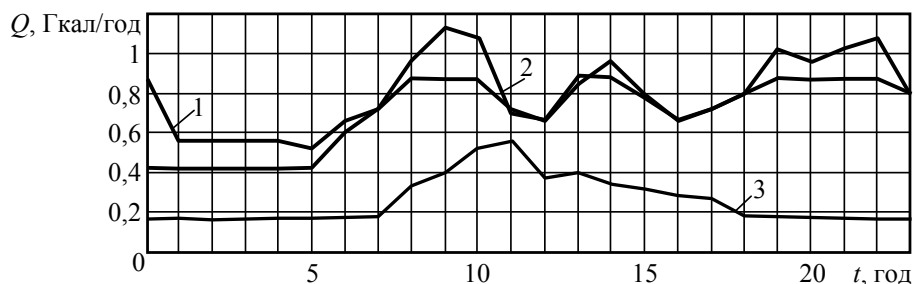


Рис. 3. Теплове навантаження когенераційної системи: утилізоване тепло за електричним графіком без акумуляції (1), споживання тепла (2), утилізоване тепло з продажем електроенергії до мережі з акумуляцією (3)

### Висновки

Обґрунтовано принцип створення, аналіз і оптимізацію системи енергопостачання на основі комбінованої системи, що поєднує в собі когенераційну установку на базі мікротурбіни та водогрійний котел з баком-акумулятором. При аналізі режимів роботи системи енергопостачання враховувалася зміна теплового навантаження споживачів.

Розроблено математичну модель системи енергозабезпечення, яка являє собою замкнуту систему рівнянь для кожного елемента системи. Математична модель враховує змінні режими роботи системи енергозабезпечення і зручна для її оптимізації та чисельного моделювання.

Проведено оптимізацію графіків добового навантаження, що дозволило обрати режими, які забезпечують максимальну економічну ефективність за будь-яких умов роботи, а розроблена методика і програма оптимізації можуть бути використані для щодобового планування погодинного електричного і теплового навантаження системи енергозабезпечення.

### Література

1. Пути совершенствования систем теплоснабжения / Н.Д. Андрийчук, В.И. Соколов, А.А. Коваленко, К.М. Дядичев. — Луганск: Изд-во Восточноукр. нац. ун-та им. В. Даля, 2003. — 244 с.
2. Энергетична стратегія України на період до 2030 р. // Відом. М-ва палива та енергетики України: інформ.-аналіт. бюл. Спец. вип. — К., 2006. — 113 с.
3. Другосельский, В.И. Надстройка водогрейных котельных газотурбинными установками / В.И. Другосельский // Теплоэнергетика. — 1999. — № 1. — С. 47 — 50.
4. Долинский, А.А. Экологические и ресурсосбережение. Энергоэффективность и охрана окружающей среды / А.А. Долинский, В.Н. Клименко, П.П. Сабашук // Энергоэффективность. — 2001. — № 4. — С. 17 — 21.
5. Бекман, Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гилли. — М.: Мир, 1987. — 271 с.

### References

1. Puti sovershenstvovaniya sistem teplosnabzheniya [Ways to improve heating systems.] / N.D. Andriyчук, V.I. Sokolov, A. Kovalenko, K.M. Dyadichev. — Lugansk: Izd-voVostochnoukr. nats. uni-ta im. Dalia[Publishing House of the East Ukrainian National Dal Uuniversity], 2003. — 244 p.
2. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 r. [ Energy Strategy of Ukraine up to 2030] // Vidom. M-va palyva ta enerhetyky Ukrainy: inform.-analit. biul.: Spets. Vypusk[Newsletter of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Special Issue] . — 2006. — 113 p.
3. Drugosel'skiy, V.I. Nadstroyka vodogreynykh kotel'nykh gazoturbinnymi ustanovkami [Buildup of hot-water boilers by gas-turbine installations] // Teploenergetika [Thermal Engineering], 1999, # 1. — pp. 47 — 50.

4. Dolinskiy, A.A., Ekotekhnologii i resursozberezenie. Energoeffektivnost' i okhrana okruzhaiyushchey sredy [Environmental Technology and Resource-saving. Energy efficiency and environmental protection]. A.A. Dolinskiy, V.N. Klimenko, P.P. Sabashuk //Energoeffektivnost' [Energy efficiency]. — 2001. — # 4. — pp. 17 — 21.
5. Bekman, G . Teplovoe akkumulirovanie energii [Thermal energy storage] / G. Bekman, P. Gilli. — Moscow, 1987. — 271 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Денисова А.Є.

Надійшла до редакції 4 квітня 2013 р.

УДК 621.315.615.2

**С.В. Зайцев**, інженер,  
**В.А. Кишневский**, канд. техн. наук, проф.,  
Одес. нац. політехн. ун-т

## ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ РАСТВОРЕННЫХ В ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЛАХ КОМПОНЕНТОВ

*С.В. Зайцев, В.А. Кишневский. Газохроматографічні методи визначення вмісту розчинених у трансформаторних маслах компонентів.* Розглянуто деякі проблеми, пов'язані із вимірюванням методами газової хроматографії вмісту компонентів ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_3H_6$ ,  $1-C_4H_8$ , іонолу, фуранових сполук), розчинених у трансформаторних маслах у процесі їх експлуатації у електричному обладнанні, та шляхи їх вирішення.

*Ключові слова:* газова хроматографія, трансформаторне масло, розчинені гази, іонол, фуранові сполуки.

*С.В. Зайцев, В.А. Кишневский. Газохроматографические методы определения содержания растворенных в трансформаторных маслах компонентов.* Рассмотрены некоторые проблемы, связанные с определением методами газовой хроматографии содержания компонентов ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_3H_6$ ,  $1-C_4H_8$ , ионола, фурановых соединений), растворенных в трансформаторных маслах в процессе их эксплуатации в электрическом оборудовании, и пути их решения.

*Ключевые слова:* газовая хроматография, трансформаторное масло, растворенные газы, ионол, фурановые соединения.

*S.V. Zaitsev, V. A. Kishnevsky. Gas chromatographic methods for determining the content of components dissolved in transformer oils.* Some problems and ways of their solution are considered, dialing with determination of the contents of components ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_3H_6$ ,  $1-C_4H_8$ , ionol, furan compounds), dissolved in transformer oils in their operation process within the electric equipment, by the gas chromatography methods.

*Keywords:* gas chromatography, transformer oil, the dissolved gases, ionol, furan compounds.

На объектах электроэнергетики в Украине эксплуатируется электрическое оборудование (МНЭО), заполненное трансформаторными маслами различных марок или их смесями, в которых при их подготовке и в процессе эксплуатации необходимо контролировать содержание растворенных компонентов, характеризующих процессы изменения трансформаторных масел и возникновения и развития дефектов в МНЭО. Газохроматографические (ГХ) методы определения содержания