
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПОБУДОВИ ІДЕНТИФІКАТОРІВ ЗМІННИХ
СТАНУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА****Александров Г. А., Кравченко М. В., Тимофеев К. Ю., Шерemet О. І.**

Для реализации классических принципов векторного управления автоматизированным электроприводом необходима полная и достоверная информация о текущих значениях переменных состояния. Вместе с тем, в силу конструктивных особенностей асинхронного двигателя, электромагнитные переменные его роторной цепи (ток и потокосцепления ротора) труднодоступны для непосредственного определения с помощью измерительных преобразователей. В этих условиях текущее состояние объекта управления оценивается косвенно с помощью идентификаторов состояния, представляющих собой вычислительные устройства, работающие в реальном масштабе времени. В результате проведенного анализа современных способов идентификации переменных состояния асинхронного двигателя с позиции сложности их технической реализации предложена собственная математическая модель идентификатора. Разработанный идентификатор работает на основе информации о векторе тока статора, угловой частоте гладкой составляющей напряжения статора и о скорости вращения вала. Однако следует иметь в виду, что при подаче в идентификатор измеренных значений токов статора, при численном интегрировании уравнений в неидеальной цифровой модели, вычисленные модельные значения переменных могут отличаться от фактических. Различия могут возникать также в том случае, если начальные условия, установленные в вычислительной модели, не соответствуют начальным условиям для объекта. Аналогичные последствия вызывают и при воздействии параметрических возмущений в объекте управления, связанных с изменением его параметров в процессе работы. В таких случаях следует применять критерий адекватности информации на выходе идентификатора, по которому можно было бы судить о степени несоответствия вычислительных и истинных значений переменных.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, идентификатор, переменные состояния, векторное управление.

Для реалізації класичних принципів векторного керування автоматизованим електроприводом необхідна повна і достовірна інформація про поточні значення змінних стану. Разом з тим, в силу конструктивних особливостей асинхронного двигуна, електромагнітні змінні його роторного кола (струм і потокосцеплення ротора) важкодоступні для прямого визначення за допомогою вимірювальних перетворювачів. У цих умовах поточний стан об'єкта керування оцінюється непрямо за допомогою ідентифікаторів стану, що представляють собою обчислювальні пристрої, які працюють в реальному масштабі часу. В результаті проведеного аналізу сучасних способів ідентифікації змінних стану асинхронного двигуна з позиції складності їх технічної реалізації запропонована власна математична модель ідентифікатора. Розроблений ідентифікатор працює на основі інформації про вектор струму статора, кутову частоту гладкої складової напруги статора і про швидкість обертання валу. Проте слід мати на увазі, що при подачі в ідентифікатор вимірюваних значень струмів статора, при чисельному інтегруванні рівнянь у неідеальній цифровій моделі, обчислені модельні значення

змінних можуть відрізнятися від фактичних. Відмінності можуть виникати також в тому разі, якщо початкові умови, встановлені в обчислювальній моделі, не відповідають початковим умовам для об'єкта. Аналогічні наслідки викликають і при дії параметричних збурень в об'єкті керування, пов'язаних зі зміненням його параметрів в процесі роботи. В таких випадках слід застосовувати критерій адекватності інформації на виході ідентифікатора, за яким можна було б робити висновок про ступінь невідповідності обчислюваних і істинних значень змінних.

Ключові слова: асинхронний двигун, ідентифікатор, змінні стану, векторне керування.

To implement the classical principles of vector control, an automated electric drive requires complete and reliable information about the current values of the state variables. However, due to the design features of an asynchronous motor, the electromagnetic variables of its rotor circle (current and flow coupling of the rotor) are difficult to obtain for direct determination using measuring transducers. In these conditions, the current state of the control object is evaluated indirectly using state identifiers representing computing devices that run in real time. As a result of the analysis of modern methods of identifying the variables of the state of the asynchronous motor from the standpoint of the complexity of their technical implementation, an own mathematical model of the identifier is proposed. The developed identifier works on the basis of information about the stator current vector, the angular frequency of the stator voltage smooth component and the speed of the shaft rotation. However, it should be borne in mind that when the stator currents are measured in the identifier, when numerical integration of the equations in the non-ideal digital model, the calculated model values of the variables may differ from the actual ones. Differences can also occur if the initial conditions set in the computing model do not match the initial conditions for the object. Similar effects are caused by the influence of parametric disturbances in the control object associated with changing its parameters in the process of operation. In such cases, the criterion of the adequacy of the information on the output of the identifier should be applied, which would allow us to conclude that the degree of discrepancy between the calculated and true values of the variables.

Keywords: asynchronous motor, identifier, state variables, vector control.

Шеремет А. И.

д-р техн. наук, зав. каф. ЭСА ДГМА
sheremet-a@mail.ru

Александров Г. А.

магистр кафедры ЭСА ДГМА

Кравченко М. В.

магистр кафедры ЭСА ДГМА

Тимофеев К. Ю.

магистр кафедры ЭСА ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.313.333

Александров Г. А., Кравченко М. В., Тимофеев К. Ю., Шерemet О. І.

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПОБУДОВИ ІДЕНТИФІКАТОРІВ ЗМІННИХ СТАНУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Для реалізації класичних принципів векторного керування автоматизованим електроприводом необхідна повна і достовірна інформація про поточні значення змінних стану. Разом з тим, в силу конструктивних особливостей асинхронного двигуна, електромагнітні змінні його роторного кола (струм і потокозчеплення ротора) важкодоступні для прямого визначення за допомогою вимірювальних перетворювачів.

У цих умовах поточний стан об'єкта керування оцінюється непрямо за допомогою ідентифікаторів стану, що представляють собою обчислювальні пристрої, які працюють в реальному масштабі часу [1, 2]. Математична структура подібних обчислювальних пристроїв, призначених для аналогової або цифрової реалізації, будується за рівняннями динаміки, що описують електромагнітні процеси в асинхронному двигуні [3].

При побудові векторних систем керування виникає також задача отримання інформації про швидкість обертання приводу. Тут можливі два підходи. Перший полягає в установці датчика швидкості на валу. Другий підхід полягає в тому, щоб оцінювати швидкість побічно за рахунок введення в структуру ідентифікатора моделі електромеханічних процесів в автоматизованому електроприводі (АЕП) в тому чи іншому вигляді [4].

Метою даної статті є проведення аналізу сучасних способів ідентифікації змінних стану асинхронного двигуна з позиції складності їх технічної реалізації та пропонування власної математичної моделі ідентифікатора.

До основних моментів при проектуванні АЕП, що визначають вибір того чи іншого варіанту співвідношення датчикової системи і системи ідентифікатора, можна віднести специфічні особливості виробництв, в умовах яких буде експлуатуватися електропривод, задану величину діапазону регулювання швидкості, швидкодію реалізуючої елементної бази.

Іноді доцільним є варіант, при якому для забезпечення заданого діапазону регулювання швидкості встановлення датчика на валу є неминучою внаслідок, наприклад, недостатньої адекватності математичних моделей, що використовуються для ідентифікації у всьому діапазоні регулювання. Аналіз питання свідчить, що доступність інформації про швидкість приводу з датчика істотно спрощує математичну структуру ідентифікатора змінних ротора, і, як наслідок, знижуються вимоги до швидкодії мікропроцесорної системи [5]. Однак надійні і масогабаритні показники АЕП в цілому тут погіршуються.

В іншому випадку, зважаючи на відсутність електромеханічного датчика на валу, що представляє собою досить дорогий і чутливий до негативних факторів навколишнього середовища пристрій, апаратура керування, що має в своєму складі чутливу електроніку, може розташовуватися на достатньому віддаленні від двигуна, який при цьому може знаходитися, наприклад, в умовах дії потужних електромагнітних випромінювань, вібрацій, органічно і хімічно агресивних середовищ, середовищ з підвищеним вмістом пилу і вологи. Зв'язок об'єкта регулювання і апаратури управління в цьому випадку здійснюється всього трьома силовими фазними провідниками.

Такий підхід забезпечує поліпшення масогабаритних і надійнісних показників АЕП, що може мати вирішальне значення при його застосуванні в специфічних умовах деяких конкретних виробництв (наприклад, в деяких галузях хімічної або текстильної промисловості). Однак відновлення інформації про швидкість АЕП призводить до значного ускладнення структури ідентифікатора асинхронного двигуна (АД), внаслідок чого можуть виникати труднощі при його цифровій реалізації, пов'язані з обмеженою швидкодією доступних

мікропроцесорних систем. Подібні системи керування електроприводами отримали назву бездатчикових і застосовуються, як правило, там, де не потрібно високоякісне регулювання швидкості в дуже широкому діапазоні. Максимальна величина діапазону регулювання швидкості в системах з безсенсорним управлінням зазвичай не перевищує 100:1.

Питанням ідентифікації змінних стану асинхронного двигуна присвячена велика кількість робіт. Запропоновані в більшості робіт методи непрямого визначення координат призначаються головним чином для практичної реалізації на базі аналогово-дискретних елементів. Аналіз цих методів показує, що їх програмно-апаратна реалізація на базі мікропроцесорів буде пов'язана з певними труднощами.

В багатьох роботах в якості основи для побудови математичних структур ідентифікаторів АД, які відновлюють вектор потокозчеплення ротора, виступає математична модель електромагнітного перетворювача (ЕМП) на основі рівнянь Парка. При побудові ідентифікаторів широко використовуються структури з великими коефіцієнтами підсилення, ковзні режими і теорія систем зі змінною структурою [6, 7].

Спільною особливістю багатьох підходів є використання для цілей ідентифікації рівнянь стану об'єкта управління, що описують всю множину можливих траєкторій його руху в просторі станів. Іншими словами, ідентифікатори будуються на основі моделі Парка, рівняння якої коректно (з урахуванням прийнятих спрощень) описують поведінку АД при його керуванні за будь-якими можливим законам, в тому числі і при його роботі в розімкнутій системі. Використання для цілей ідентифікації універсальних в такому розумінні рівнянь Парка обумовлює в певному сенсі автономність вирішення задач отримання інформації про об'єкт і, власне, керування одна від одної. Такий підхід, зокрема, дає можливість налаштовувати ідентифікатори окремо від іншої частини системи управління.

Дійсно, зміна взаємного просторового розташування статора і ротора при обертанні вала призводить до того, що параметри електромагнітних зв'язків між їх обмотками змінюються. При цьому спільне використання в ідентифікаторі моделей електромагнітних процесів в статорі і роторі дозволяє встановлювати кількісний зв'язок між параметрами обертання валу і величинами електромагнітних змінних.

Швидкість обертання валу в структурах ідентифікаторів, що розглядаються в роботі [8], можна оцінити як відношення оцінок модулів векторів електрорушійної сили (ЕРС) обертання і потокозчеплення ротора. Оцінки модулів векторів визначається через їх компоненти в нерухомій системі координат α, β [9].

Компоненти вектору потокозчеплення ротора обчислюються на виходах інтеграторів, інтегруючих покомпонентно диференціальні рівняння моделі роторного кола АД.

Компоненти вектора ЕРС оцінюються в моделі статорного кола, виходячи з умови збігу обчислюваної в них оцінки струму статора і його фактичної величини, що подається на вхід цієї моделі з датчиків струму. Виконання цієї умови збігу здійснюється за рахунок навмисного введення в модель ковзних режимів, або великих коефіцієнтів підсилення, при цьому організовується система стеження за фактичним струмом статора.

Аналіз структур ідентифікаторів, які описуються в роботі [10], говорить про їх непрацездатності в точці, що відповідає нульовій швидкості обертання валу. У цій точці система стеження за струмом статора видає відмінні від нуля оцінки компонент вектора ЕРС обертання, в той час як їх фактичні значення рівні нулю. Відповідно і оцінки компонент вектора потокозчеплення ротора в цій точці будуть обчислюватися моделлю роторного кола невірно.

Зниження робочої швидкості приводу при наближенні до точки, відповідної її нульовому значенню, буде супроводжуватися збільшенням помилки відновлення вектора потокозчеплення ротора. Дана обставина пов'язана з тим, що відбувається зменшення частки складових ЕРС обертання в рівняннях моделі статорного кола в порівнянні з іншими складовими. Оцінювання таких малих значень компонент вектора ЕРС обертання в цих умовах здійснюється з великою похибкою. Отже, знижується і достовірність інформації про вектор потокозчеплення ротора і швидкості АД на виході ідентифікатора. Застосування зазначених

структур ідентифікаторів не дозволить здійснити точну орієнтацію векторних змінних АД на малих швидкостях в системі векторного керування. Такі ідентифікатори не дозволяють отримувати високоякісне регулювання швидкості в широкому діапазоні (понад 25:1).

Для визначення просторових векторів електромагнітних змінних в зазначених роботах використовується нерухома ортогональна координатна система α, β . Вибір цієї координатної системи був історично обумовлений тим, що в даному випадку математичні структури ідентифікаторів потокозчеплення ротора виявляються порівняно простими. Крім того, представлення вектора оцінки потокозчеплення ротора в системі координат α, β в якійсь мірі виявляється зручним для реалізації принципу орієнтації вектора струму статора, що задається, відносно відновлюваного вектора потокозчеплення ротора, який викладається в роботі [11].

Однак використання нерухокої системи координат призводить до того, що проекції обертових векторних змінних стану АД на її осі, що обчислюються в ідентифікаторі, виявляються синусоїдальними сигналами. Поява в рівняннях ідентифікатора, призначеного для цифрової реалізації, змінних, що змінюються за гармонійним законом, в силу відомих причин небажана. Тому використання таких математичних структур ідентифікаторів для їх мікропроцесорної реалізації не підходить. Для побудови структур цифрових ідентифікаторів потрібне використання таких форм представлення моделей АД, в яких в якості змінних виступають неперіодичні знакопостійні величини.

Належний вибір координатної системи, в якій будуть оцінюватися векторні змінні, дуже важливий при побудові цифрових ідентифікаторів, призначених для роботи в системі векторного керування. Якщо при побудові ідентифікатора вибрати систему полярних координат, в якій з вектором основної гармоніки напруги статора жорстко пов'язаний початок відліку кутових позицій інших векторних змінних, то всі внутрішні змінні ідентифікатора виявляться неперіодичними сигналами. При цьому є можливість використання внутрішніх змінних ідентифікатора для реалізації принципу векторної орієнтації безпосередньо без застосування додаткових функціональних і координатних перетворювачів. У цьому сенсі застосування математичної моделі ЕМП для розробки ідентифікаторів стану АД представляється перспективним [12].

Виникає задача побудови структур ідентифікаторів на основі отриманої нової форми математичного опису процесів в ЕМП. Розроблюваний ідентифікатор повинен забезпечувати високу якість відновлення координат АД, в тому числі і швидкості його обертання, без введення в структуру обчислювальної моделі механічної частини приводу в усьому діапазоні зміни швидкостей (аж до нульового значення).

У випадках, коли на валу приводу встановлено датчик швидкості, сигнал з його виходу може використовуватися при обчисленні електромагнітних змінних роторного кола в ідентифікаторі, побудованому тільки на базі моделі процесів в роторі. Необхідність використання в ідентифікаторі моделі електромагнітних процесів в статорі в цьому випадку відпадає.

Застосуємо для побудови структури ідентифікатора потокозчеплення ротора модель процесів в роторному колі в полярних координатах на основі наступних рівнянь:

$$\frac{d\Psi_R}{dt} = -\frac{R_2}{L_2}\Psi_R + R_2\frac{L_m}{L_2}I_S\cos\alpha, \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi_R}{dt} = \Omega_k - p_n\Omega - R_2\frac{L_m}{L_2}\frac{I_S}{\Psi_R}\sin\alpha. \quad (2)$$

При записі (1) і (2) кут між векторами \bar{I}_S і $\bar{\Psi}_R$ був позначений α , швидкість обертання початку відліку кутів позначена Ω_k , кутова координата вектора $\bar{\Psi}_R$ в цій системі відліку позначена як φ_R , Ψ_R – модуль цього вектора, I_S – модуль вектора струму статора.

Ідентифікатор на основі (1), (2) може функціонувати за наступним алгоритмом. За інформацією з датчиків фазних струмів обчислюється фактичний модуль вектора струму статора:

$$I_S = \sqrt{I_{S\alpha}^2 + I_{S\beta}^2}, \quad (3)$$

де $I_{S\alpha}$, $I_{S\beta}$ – поточні значення компонент вектора струму статора в нерухомій системі координат α , β . За сигналами з датчиків струму визначається також кутова позиція вектора \bar{I}_S відносно нерухомої системи відліку φ_{I_S} .

Кут повороту вектора \bar{I}_S обчислюється або через арксинус відношення однієї з його компонент до модуля, або через арккосинус відношення іншої компоненти до модуля, в залежності від того, до якої осі ближче розташовується вектор. Тим самим забезпечується висока точність обчислення кутів в разі знаходження вектора в околицях меж квадрантів. Кут повороту може змінюватися в межах від нуля до 2π .

З входу модулятора в системі керування, що реалізує алгоритм просторово-векторної модуляції, знімається інформація про задане значення кута повороту вектора напруги статора $\varphi_{U_{зад}}$ і про кутову частоту гладкої складової напруги на виході АІН $\Omega_0 = d\varphi_{U_{зад}}/dt$. Інформація про модуль вектора напруги статора не потрібна.

За відомою інформацією про кути повороту векторів струму і напруги статора можна визначити кут між цими векторами φ_S :

$$\varphi_S = \varphi_{U_{зад}} - \varphi_{I_S} \quad (4)$$

Оцінка кута φ_R між векторами \bar{U}_S і $\bar{\Psi}_R$ може бути обчислена на основі наявної інформації шляхом інтегрування наступного рівняння:

$$\frac{d\hat{\varphi}_R}{dt} = \Omega_0 - p_n \Omega - R_2 \frac{L_m}{L_2} \frac{I_S}{\bar{\Psi}_R} \sin \hat{\alpha} \quad (5)$$

Тут і далі запис виду \hat{X} позначає оцінку (модельне значення) величини X . Оцінка кута $\hat{\alpha}$, що фігурує в (5), обчислюється як різниця $\hat{\varphi}_R$ і φ_S :

$$\hat{\alpha} = \hat{\varphi}_R - \varphi_S \quad (6)$$

Рівняння (5) записано на основі (2). Вибір в якості основи системи відліку кутів плавно обертового вектора гладкої складової напруги статора (тобто підстановка в (5) замість Ω_k величини Ω_0) забезпечує неперіодичний характер зміни перемінної $\hat{\varphi}_R$.

Модуль вектора $\bar{\Psi}_R$, що фігурує в (5), оцінюється шляхом інтегрування рівняння, записаного на основі (1):

$$\frac{d\hat{\Psi}_R}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \hat{\Psi}_R + R_2 \frac{L_m}{L_2} I_S \cos \hat{\alpha} \quad (7)$$

Аналіз математичної структури ідентифікатора на основі (3) – (7) показує, що обчислення кута φ_S між векторами \bar{I}_S і $\bar{U}_{S_{зад}}$ по (4) приведе до помилки відновлення вектора $\bar{\Psi}_R$. Це можна пояснити наступним чином.

У сталому режимі роботи ідентифікатора, коли всі вектори мають постійну довжину і обертаються з постійною швидкістю, величина кутів між векторами також незмінна і знаходиться в межах від 0 до 2π . На рис. 1 приведена векторна діаграма ідентифікатора, що відповідає цьому режиму.

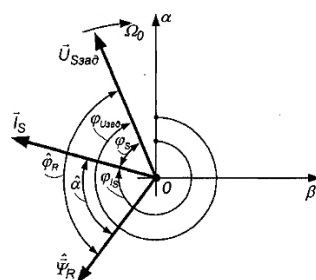


Рис. 1. Векторна діаграма ідентифікатора

Вектор $\bar{U}_{\text{Сзад}}$ при своєму обертанні випереджає вектор \bar{I}_S . В момент, коли обертовий вектор $\bar{U}_{\text{Сзад}}$ перетинає нерухому вісь α , відбувається скидання значення кута повороту $\varphi_{U\text{зад}}$ з величини 2π до 0. Відстаючий від нього вектор \bar{I}_S в цей момент ще не досягне осі α і кут φ_{I_S} в цій точці змінюватиметься плавно. Обчислення φ_S за формулою (4) приведе до того, що в цей момент часу кут між векторами струму і напруги статора зміниться стрибком на величину 2π .

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу сучасних способів ідентифікації змінних стану асинхронного двигуна з позиції складності їх технічної реалізації, запропонована власна математична моделі ідентифікатора. Розроблений ідентифікатор працює на основі інформації про вектор струму статора, кутову частоту гладкої складової напруги статора і про швидкість обертання валу.

Слід мати на увазі, що при подачі в ідентифікатор вимірних значень струмів статора, при чисельному інтегруванні рівнянь в неідеальній цифровій моделі обчислені модельні значення змінних можуть відрізнятися від фактичних. Відмінності можуть виникати також в тому разі, якщо початкові умови, встановлені в обчислювальній моделі, не відповідають початковим умовам для об'єкта. Аналогічні наслідки викликають і при дії параметричних збурень в об'єкті керування, пов'язаних зі зміненням його параметрів в процесі роботи. В таких випадках слід застосовувати критерій адекватності інформації на виході ідентифікатора, за яким можна було б робити висновок про ступінь невідповідності обчислюваних і істинних значень змінних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Восстановление электромагнитных переменных асинхронной машины, питаемой от преобразователя переменного тока / Н. Л. Архангельский, С. К. Лебедев, С. А. Анисимов и др. // Тезисы докладов III Всесоюзной научно-техн. конф. «Проблемы преобразовательной техники». – Ч. 2. – Киев : ИЭФ АНУССР, 1983. – С. 213–216.
2. Векторное управление электроприводом переменного тока с использованием идентификаторов состояния / Н. Л. Архангельский, Б. С. Курнышев, В. В. Пикунов и др. // Научно-техническая конференция «Системы и устройства автоматики и телемеханики»: тезисы докладов. – Владимир : 1984. – С. 30–31.
3. Архангельский Н. Л. Применение идентификаторов состояния в асинхронном электроприводе / Н. Л. Архангельский, Б. С. Курнышев, С. К. Лебедев // Автоматизированный электропривод / Под общ. ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – С. 359–361.
4. К вопросу косвенного измерения скорости асинхронного двигателя в системе векторного управления / В. Н. Поляков, А. А. Таран, Р. Т. Шрейнер // Труды II Межвузовской отраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии», Ч. 1. – Новоуральск : НПИ, 1999. – С. 245–248.
5. Курнышев Б. С. Идентификатор асинхронного двигателя в электроприводе для текстильной промышленности / Б. С. Курнышев, С. П. Данилов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2000. – № 6. – С. 75–78.
6. Лебедев С. К. Разработка и исследование устройств определения координат и параметров асинхронного электропривода с векторным управлением на основе датчиков тока и напряжения статора : дис. канд. техн. наук : 05.09.03 / С. К. Лебедев. – Иваново, 1985. – 290 с.
7. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления / В. И. Уткин. – М. : Наука, 1981. – 368 с.
8. А. с. СССР N'1399882. Устройство для определения координат асинхронного двигателя в регулируемом электроприводе / В. И. Уткин, Д. Б. Изосимов, Н. Л. Архангельский, Б. С. Курнышев и др. – Оpubл. в Бюл. № 20. – 1988.
9. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново : ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. – 298 с.
10. Курнышев Б. С. Минимизация структуры бескоординатной модели асинхронного двигателя тензорным методом / Б. С. Курнышев, И. Ю. Колодин // Электротехника. – 1997. – № 7. – С. 34–37.
11. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 1994.
12. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.