

## АННОТАЦИЯ

*В статье представлен анализ схемы энергопотребления для вертикально-интегрированного предприятия агропромышленного комплекса, на основании которого разработан алгоритм определения объёмов потребления ТЭР с использованием имитационного моделирования на нейросетевых моделях. Представленная методика позволяет прогнозировать объёмы энергопотребления предприятия в зависимости от номенклатуры конечной продукции и применяемого технологического оборудования.*

## ANNOTATION

*In this article the analysis of the energy consumption scheme for a vertically integrated agro-industrial plant is shown. The algorithm for determining the consumption of energy resources using imitation modeling on neural network models was developed. The presented method allows to predict the plants energy consumption depending on final products range and the structure of technological equipment.*

# Прогнозирование объёмов энергопотребления предприятия агропромышленного комплекса

**В. А. Седнин**, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», **А. А. Абрамовский**, м. т. н., Белорусский национальный технический университет

Прогнозирование объёмов энергопотребления для различных субъектов хозяйствования является важной задачей при научно обоснованном выборе типа и характеристик энергоцентра. В статье представлен анализ схемы энергопотребления для вертикально-интегрированного предприятия агропромышленного комплекса (АПК), на основании которого разработан алгоритм определения объёмов потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) с использованием имитационного моделирования на нейросетевых моделях. Указанная методика позволяет прогнозировать объёмы энергопотребления предприятия в зависимости от номенклатуры конечной продукции и применяемого технологического оборудования.

Исследование сложных производственных комплексов требует всестороннего учёта влияния на объект изучения обширного числа факторов, определяющих его состояние и характеристики. Для упрощения процессов анализа и оптимизации подобных систем, рассматривая их структуру, выделяют в ней интегральные цепочки элементов, а при возможности производят декомпозицию структуры. Рассмотрим исходя из этих положений решение зада-

чи прогнозирования объёмов потребления энергии объектами агропромышленной отрасли.

На рис. 1 показана структура комплекса по производству мясопродуктов в виде последовательной цепочки технологических процессов с указанием материальных и энергетических потоков. Подсистема *A* представлена зерносушильным комплексом и комбикормовым цехом, *B* — комплексом содержания скота, *C* — мясоперерабатывающим предприятием.

Для подсистемы *A* основное сырьё — зерновые сельскохозяйственные культуры, а конечный продукт — комбикорм. На реализацию этого технологического процесса требуется два вида ТЭР: топливо (природный газ) и электроэнергия. Производство гранулированных комбикормов потребует дополнительно тепловую энергию. Для подсистемы *B* сырьём и конечной продукцией являются соответственно комбикорм и мясо живым весом, нужны два вида ТЭР: тепловая и электрическая энергия. В подсистеме *C* из мяса в живом весе (сырьё) производится конечная продукция — мясные продукты и полуфабрикаты. Для этой подсистемы требуются все три вида ТЭР: топливо, электрическая и тепловая энергия.

При прогнозировании энергопотребления и планирования норм расхода (ТЭР) интегрированных энергетических систем с широкой номенклатурой продукции (зерно, комбикорм, мясо и т. д.) следует

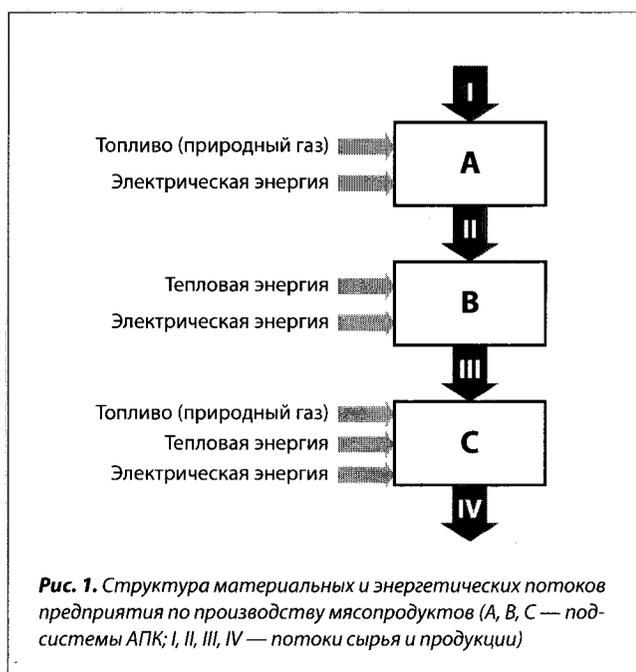
Табл. 1. Удельные расходы ТЭР на производство продукции по регионам Республики Беларусь

| Наименование производства | ТЭР     | Ед. изм.  |       | Брестская | Витебская | Гомельская | Гродненская | Минск | Минская | Могилёвская | В среднем по республике |
|---------------------------|---------|-----------|-------|-----------|-----------|------------|-------------|-------|---------|-------------|-------------------------|
|                           |         |           |       | Мин.      | Макс.     | Мин.       | Макс.       | Мин.  | Макс.   | Мин.        |                         |
| Сушка зерна               | ЭЭ      | кВт·ч/т   | Мин.  | 8         | 4         | 3          | 11          |       | 3       | 4           | 5                       |
|                           |         |           | Макс. | 15        | 85        | 4          | 36          |       | 8       | 7           | 25                      |
|                           | Топливо | кг у.т./т | Мин.  | 12        | 9         | 9          | 11          |       | 10      | 7           | 10                      |
|                           |         |           | Макс. | 19        | 28        | 17         | 20          |       | 12      | 10          | 18                      |
| Комбикорм гранулированный | ЭЭ      | кВт·ч/т   | Мин.  | 38        | 29        | 23         | 18          |       | 20      | 19          | 24                      |
|                           |         |           | Макс. | 39        | 46        | 49         | 33          |       | 45      | 208         | 70                      |
|                           | ТЭ      | Гкал/т    | Мин.  | 97        | 98        | 88         | 10          |       | 112     | 100         | 97                      |
|                           |         |           | Макс. | 112       | 114       | 89         | 148         |       | 125     | 208         | 139                     |
| Комбикорм рассыпной       | ЭЭ      | кВт·ч/т   | Мин.  | 16        | 23        | 23         | 20          |       | 15      | 15          | 19                      |
|                           |         |           | Макс. | 26        | 25        | 26         | 35          |       | 28      | 26          | 28                      |
| Содержание свиней         | ЭЭ      | кВт·ч/т   | Мин.  | 100       | 140       | 42         | 54          |       | 77      | 45          | 76                      |
|                           |         |           | Макс. | 108       | 216       | 160        | 501         |       | 300     | 123         | 234                     |
|                           | ТЭ      | Гкал/т    | Мин.  | 208       | 391       | 8          | 114         |       | 310     | 354         | 231                     |
|                           |         |           | Макс. | 318       | 600       | 420        | 323         |       | 339     | 573         | 429                     |
| Мясо                      | ЭЭ      | кВт·ч/т   | Мин.  | 308       | 452       | 338        | 33          | 395   | 173     | 344         | 261                     |
|                           |         |           | Макс. | 556       | 1061      | 663        | 737         | 452   | 435     | 637         | 648                     |
|                           | ТЭ      | Гкал/т    | Мин.  | 878       | 935       | 691        | 510         | 570   | 635     | 662         | 697                     |
|                           |         |           | Макс. | 929       | 1624      | 745        | 700         | 891   | 1258    | 915         | 1008                    |
| Колбасные изделия         | ЭЭ      | кВт·ч/т   | Мин.  | 469       | 153       | 388        | 105         | 370   | 434     | 246         | 309                     |
|                           |         |           | Макс. | 580       | 571       | 550        | 212         | 937   | 960     | 600         | 630                     |
|                           | ТЭ      | Гкал/т    | Мин.  | 831       | 1298      | 1005       | 860         | 1075  | 1612    | 988         | 1095                    |
|                           |         |           | Макс. | 1488      | 2545      | 3985       | 1632        | 1470  | 4488    | 1162        | 2395                    |

применять условную единицу продукции, в качестве которой выберем одну тонну мяса живым весом. Это позволит достаточно просто переходить от подсистемы В к подсистеме С по цепочке «продукция–сырьё». Таким образом, подсистемы будут связаны единой условной единицей без применения переводных коэффициентов.

В табл. 1 приведены результаты отчётно-статистического анализа фактических удельных расходов ТЭР на производство конкретных видов продукции по регионам республики [1]. Как видно, удельные расходы ТЭР на производство различных видов продукции значительно отличаются. Для прогнозирования энергопотребления предприятия с высокотехнологичным оборудованием можно исходить из следующего:

- ♦ для подсистемы А удельное потребление ТЭР принимается на основании технических характеристик современных зерносушильных комплексов: 5–10 кВт·ч/т [2, 3, 4];
- ♦ для подсистемы В расход электрической энергии — 1,16 МВт·ч/т, тепловой — 3,74 Гкал/т [5];
- ♦ для подсистемы С — на основании норм расхода на конкретные технологические процессы и номенклатурного перечня.



Принципиальная схема энергетических потоков типового мясоперерабатывающего предприятия с собственным теплоисточником, обеспечивающим предприятие тепловой энергией в виде пара и горячей воды, и электроснабжением от энергосистемы представлена на рис. 2 [6, 7].

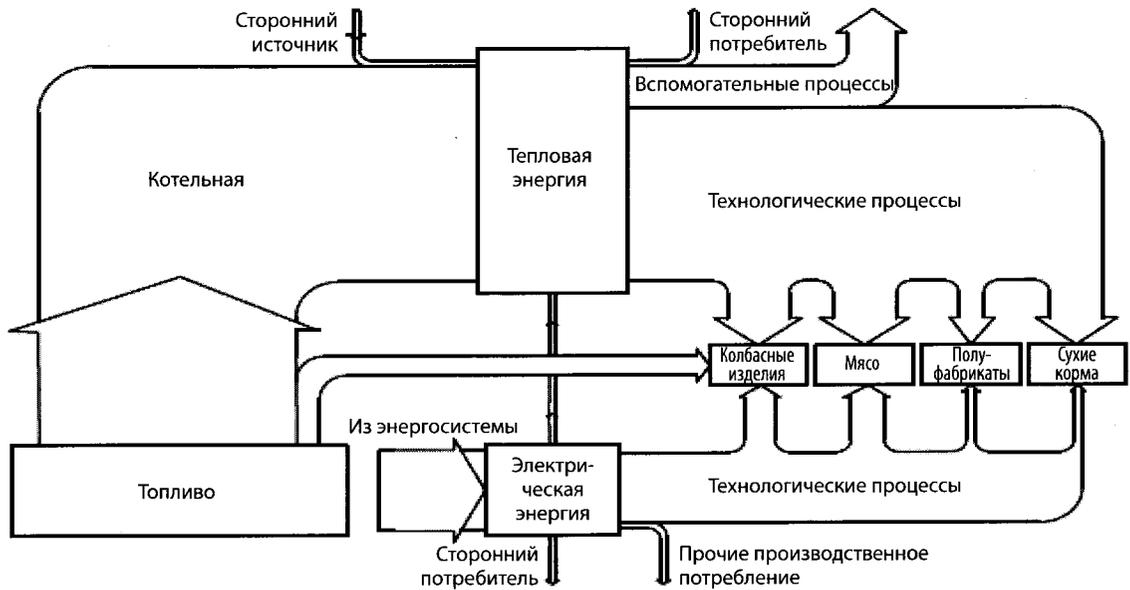


Рис. 2. Принципиальная схема энергетических потоков типового мясоперерабатывающего предприятия

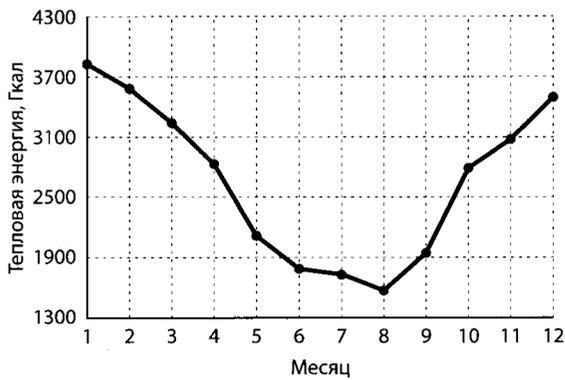


Рис. 3. Изменение объёмов теплового потребления в течение года

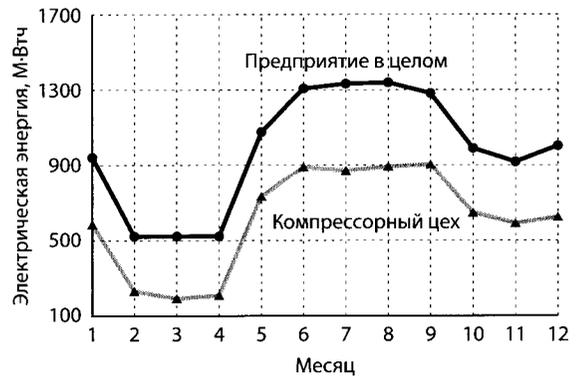


Рис. 4. Изменение объёмов потребления электрической энергии в течение года

Энергопотребление предприятия носит явно выраженный сезонный характер. Графики потребления тепловой и электрической энергии представлены на рис. 3 и 4.

Соотношение потребления тепловой и электрической энергий выражается формулой:

$$K = E_T / E_{ЭЛ}$$

где  $K$  — соотношение потребления тепловой и электрической энергий,  $Гкал/МВт·ч$ ;

$E_T$  — потребление тепловой энергии,  $Гкал$ ;

$E_{ЭЛ}$  — потребление электрической энергии,  $МВт·ч$ .

В летние месяцы это соотношение близко к единице (рис. 5) из-за увеличения электропотребления

компрессорного цеха и отсутствия теплового потребления на нужды отопления.

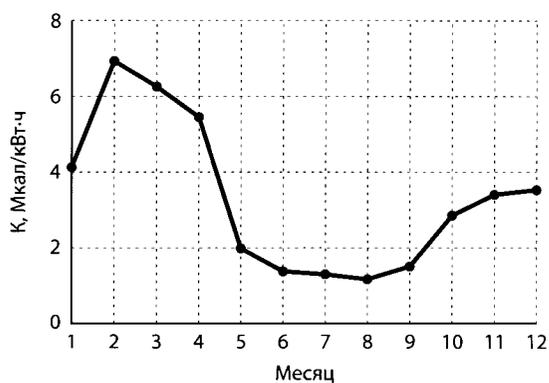
Очевидно, что наибольшее влияние на суммарное электропотребление предприятия оказывает компрессорный цех. Чтобы определить зависимость его электропотребления от температуры наружного воздуха, применялась линейная регрессионная модель, общий вид которой можно представить следующим образом:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x,$$

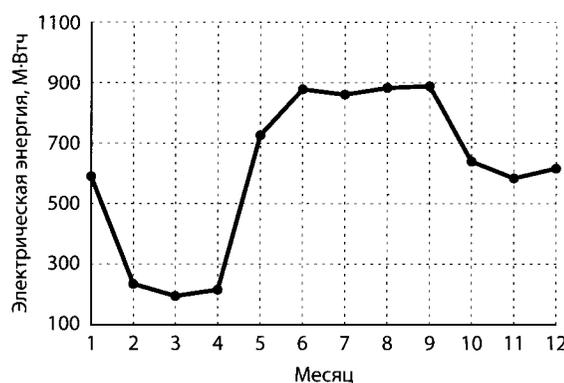
где  $y$  — электропотребление компрессорного цеха за отчётный месяц,  $тыс. кВт·ч$ ;

$x$  — температура наружного воздуха,  $°C$ ;

$a_0, a_1$  — коэффициенты регрессии.



**Рис. 5.** Изменение соотношения потребления тепловой и электрической энергии в течение года



**Рис. 6.** Изменение электропотребления компрессорного цеха в течение года

Исходные данные для расчёта сведены в табл. 2. Среднемесячные температуры — на основе метеорологических замеров в районе Минска [8].

Параметры модели линейной регрессии рассчитывались с помощью метода наименьших квадратов и равны:  $a_0 = 424,39$ ;  $a_1 = 22,21$ . Таким образом, модель имеет вид:

$$Y = 424 + 22,2x.$$

Коэффициент детерминации  $R^2$  для данной модели — 0,58. Это свидетельствует о том, что модель с одним предиктором в виде температуры окружающего воздуха не в состоянии с достаточной достоверностью детерминировать зависимую переменную, то есть на электропотребление компрессорного цеха оказывает влияние не только температура наружного воздуха, но и ряд других параметров, носящих стохастический характер.

Учитывая этот момент, обратимся к уравнению модели общего вида:

$$y = f(x_i, z_j, w_i),$$

где  $y$  — значение критерия, характеризующего качество поведения системы;

$x_i$  — управляемые независимые переменные;

$z, w$  — переменные и постоянные, которые влияют на  $y$ , но не поддаются управлению;

$f$  — оператор преобразования, задающий соотношения между  $y$  и  $x, z, w$ .

В качестве целевых функций принимаются удельные расходы электрической и тепловой энергии на переработку 1 т первичного сырья. Для выбора влияющих факторов следует обратиться к номенклатурному перечню продукции мясоперерабатывающего предприятия. При этом необходимо стремиться

**Табл. 2.** Электропотребление компрессорного цеха (рис. 6) и температура наружного воздуха по месяцам за 2015 год

| Месяц         | Янв  | Фев  | Март | Апр | Май  | Июнь |
|---------------|------|------|------|-----|------|------|
| Е, тыс. кВт·ч | 588  | 233  | 194  | 211 | 726  | 882  |
| t, °С         | -0,9 | -1,6 | 4,1  | 7,2 | 12,7 | 17,6 |
| Месяц         | Июль | Авг  | Сен  | Окт | Нояб | Дек  |
| Е, тыс. кВт·ч | 861  | 885  | 893  | 640 | 584  | 619  |
| t, °С         | 18,7 | 21,2 | 14,4 | 5,4 | 3,8  | -2,5 |

определить минимальное количество факторов, при которых достигается решение поставленных задач, так как увеличение числа факторов значительно усложняет процесс моделирования системы.

В общем виде на удельные расходы энергетических ресурсов предприятия влияет множество факторов. Из них в качестве управляющих переменных в дальнейшем будут использованы 9: количество производимого мяса свинины, варёных колбасных изделий, копчёностей, субпродуктов, удельный расход ТЭР на производство 1 т этих же продуктов и электропотребление компрессорного цеха.

Такой выбор обусловлен варьированием номенклатурных перечней предприятий отрасли и существенным отличием удельных расходов ТЭР на производство разных видов продукции. Это в конечном счёте значительно влияет на расход ТЭР на единицу первичного сырья. В то же время расходы ТЭР на горячее водоснабжение, отопление и вентиляцию можно принять как постоянные, так как нет их непосредственной зависимости от номенклатуры продукции и специфики техпроцессов.

Для получения взаимозависимости между выбранными факторами и прогнозированием электропотребления в дальнейшем использовалась методика нейросетевого прогнозирования. Нейросетевые модели (НС-модели) обладают высокой

Табл. 3. Значения предикторов и выходного параметра

| $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ | $X_{11}$ | $Y$  | $Y'$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|------|------|
| 420   | 450   | 305   | 177   | 93    | 41    | 41    | 154   | 216   | 220      | 870      | 1290 | 1187 |
| 490   | 491   | 354   | 172   | 116   | 41    | 41    | 154   | 210   | 220      | 885      | 1322 | 1190 |
| 448   | 616   | 346   | 163   | 120   | 40    | 40    | 154   | 210   | 220      | 893      | 1276 | 1184 |
| 396   | 478   | 288   | 191   | 118   | 40    | 40    | 154   | 216   | 220      | 640      | 976  | 1051 |
| 376   | 482   | 259   | 151   | 101   | 40    | 40    | 154   | 216   | 220      | 584      | 903  | 936  |
| 433   | 468   | 257   | 205   | 100   | 40    | 40    | 154   | 221   | 220      | 619      | 990  | 969  |
| 298   | 528   | 214   | 137   | 93    | 40    | 40    | 154   | 221   | 221      | 588      | 931  | 914  |
| 418   | 437   | 240   | 132   | 100   | 40    | 40    | 151   | 216   | 216      | 233      | 515  | 521  |
| 617   | 571   | 302   | 168   | 102   | 40    | 40    | 150   | 216   | 196      | 194      | 515  | 520  |
| 692   | 511   | 318   | 206   | 100   | 40    | 40    | 145   | 210   | 187      | 211      | 516  | 528  |
| 551   | 541   | 408   | 207   | 97    | 40    | 40    | 145   | 210   | 186      | 726      | 1060 | 1162 |
| 555   | 554   | 401   | 194   | 98    | 40    | 40    | 145   | 210   | 186      | 882      | 1287 | 1280 |
| 419   | 448   | 347   | 177   | 93    | 40    | 40    | 145   | 210   | 186      | 861      | 1315 | 1252 |
| 586   | 491   | 377   | 172   | 116   | 40    | 40    | 145   | 210   | 186      | 885      | 1318 | 1246 |
| 549   | 616   | 411   | 163   | 120   | 39    | 39    | 145   | 210   | 190      | 863      | 1266 | 1181 |

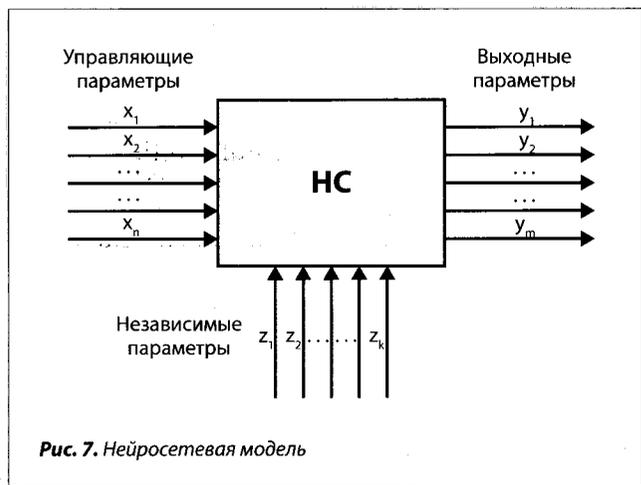


Рис. 7. Нейросетевая модель

аппроксимирующей способностью и позволяют обрабатывать статистическую информацию и выполнять прогнозные оценки [9]. По своей сути имитационная НС-модель представляет собой «чёрный ящик» с множеством управляющих, выходных (зависимых) и независимых параметров (рис. 7).

На первом этапе моделирования производится настройка алгоритма имитации путём предъявления НС-модели известных входных и соответствующих им выходных параметров, при этом чем больше вариантов «правильных» исходных данных типа различных пар «входной–выходной» параметр будет предъявлено, тем адекватнее решаемой задаче будет сконструирована модель [10, 11]. На втором этапе (после этапа обучения НС-модели) задаём исходные данные решаемой задачи и получаем «правильное решение», реализуемое на способности применяемого метода к обобщению.

С учётом располагаемой статистической информации управляющими параметрами, значения ко-

торых за отчётный месяц подаются на соответствующие входы, являются:

- ♦ объёмы производства, т ( $X_1 \dots X_5$ ) и удельный расход ТЭР, кВт·ч/т на производство 1 т ( $X_6 \dots X_{10}$ ) соответственно мяса свинины, мяса говядины, варёных колбасных изделий, копчёностей, субпродуктов;
- ♦ электропотребление компрессорного цеха, тыс. кВт·ч ( $X_{11}$ ).

Выходным параметром  $Y$  выбрано электропотребление предприятия за месяц, МВт·ч. Значения входных и выходных параметров за 15 отчётных месяцев, а также результат расчёта ( $Y'$ ) для стартового массива информации сведены в табл. 3.

Для обработки данных был использован прикладной программный продукт Deductor Studio Academic 5.3. Исходное множество данных было разбито на обучающее и тестовое подмножества: первые 12 значений (80 %) устанавливаются в качестве обучающего множества, последние 3 (20 %) — как тестируемое. Далее была выбрана сигмоидальная функция с одним и двумя скрытыми слоями в структуре нейронной сети с 5-процентной ошибкой по тестовому множеству. Успешное обучение модели было завершено только для сигмоидальной функции с одним скрытым слоем и выводом результатов при распознавании тестового множества со средней ошибкой менее 5 %.

Граф смоделированной нейронной сети и алгоритм расчёта прогнозных показателей электропотребления представлены на рис. 8 и 9.

Таким образом, НС-модель позволяет определять удельное электропотребление в зависимости от номенклатуры продукции и применяемого технологического оборудования.

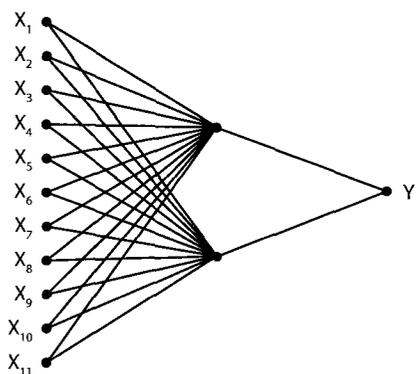


Рис. 8. Граф смоделированной нейронной сети

### Выводы

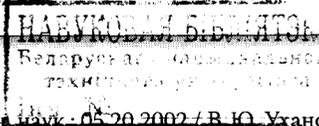
Результаты исследования позволяют предложить методику определения прогнозных объёмов энергопотребления вертикально-интегрированного предприятия АПК с использованием имитационного моделирования. Исходными данными для решения задачи являются: схема (структура) энергопотребления с энергетическими и материальными потоками, расчётно-статистическая и аналитическая информация по удельным величинам энергопотребления технологических линий, технические характеристики оборудования, номенклатура выпускаемой продукции, условно-постоянные составляющие энергозатрат на всех уровнях производства. Результат — прогнозные показатели удельных норм и объёмов потребления ТЭР.

### Литература

1. Официальная статистика // Реальный сектор экономики [Электронный ресурс]. — 2016. — Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/energeticheskaya-statistika/>. — Дата доступа: 31.03.2016.
2. Зерносушильные комплексы // КЗСВ [Электронный ресурс]. — 2016. — Режим доступа: <http://www.lidselmash.by/zerno/doc/27/>. — Дата доступа: 21.03.2016.
3. Агропромышленный комплекс // Зерносушильный комплекс [Электронный ресурс]. — 2016. — Режим доступа: [http://amkodor.by/catalog/agropromyshlenny/zernosushilnye\\_kompleksy/zernoochistitelno\\_sushilnyy\\_kompleks\\_zsk\\_30sh/](http://amkodor.by/catalog/agropromyshlenny/zernosushilnye_kompleksy/zernoochistitelno_sushilnyy_kompleks_zsk_30sh/). — Дата доступа: 21.03.2016.
4. Оборудование // Зерносушилки Riela [Электронный ресурс]. — 2016. — Режим доступа: [http://riela-sib.ru/catalog/zernosushilki\\_riela/](http://riela-sib.ru/catalog/zernosushilki_riela/). — Дата доступа: 21.03.2016.
5. Уханова, В. Ю. Разработка методики определения нормативов и потребности в энергии на перспективу в сельскохозяйственном производстве на примере отрасли свиноводства



Рис. 9. Алгоритм определения прогнозных объёмов энергопотребления предприятия АПК



человека: дис.канд. техн. наук. — Минск: БГУТУ, 05.20.2002 / В. Ю. Уханова. — Москва, 2013. — 172 л.

6. Несенчук, А. П. Энергоснабжение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счёт утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А. П. Несенчук, А. А. Абразовский // Известия вузов. Энергетика. — 2013. — № 6. — С. 32–36.

7. Абразовский, А. А. Энергосбережение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счёт утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А. А. Абразовский // Инновации, энергоэффективность, образование — залог бережливости: материалы VII науч.-практ. конф., Гродно, 17–19 окт. 2013 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ; редкол.: А. А. Лапко [и др.]. — Минск, 2013. — С. 17–19.

8. Архив метеорологических наблюдений [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://http://pogoda.by/zip/index.php?Year=2015/>. — Дата доступа: 06.12.2015.

9. Паршуков, Д. В. Моделирование и статистическая обработка результатов исследования: учеб. пособие / Д. В. Паршуков. — Красноярск, 2015. — 166 с.

10. Боровиков, В. П. Прогнозирование в системе Stastica в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере / В. П. Боровиков, Г. И. Ивченко. — М.: Финансы и статистика, 1999. — 384 с.

11. Большов, А. А. Прогнозирование энергопотребления: современные подходы и пример исследования / А. А. Большов, М. Ф. Каневский, Е. А. Савельева и др. // Известия РАН: энергетика. — 2004. — № 6. — С. 74–92.