



# В Е С Т Н И К

ГОМЕЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ П. О. СУХОГО

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗДАЕТСЯ С МАРТА 2000 г.

3(46)' 2011

Главный редактор

**С. И. ТИМОШИН**

Заместитель  
главного редактора

**А. А. БОЙКО**

Ответственный  
секретарь

**Т. Г. ЯНУЩЕНКО**

Адрес редакции:

**Редакционная коллегия:**

О. Д. Асенчик, М. Н. Верещагин, В. А. Голуб,  
Р. И. Громько, Н. В. Грунтович, В. М. Кенько,  
Е. М. Карпенко, Г. М. Лыч, Н. К. Мышкин,  
А. А. Панков, Е. Н. Подденежный, Б. В. Сорвилов,  
А. В. Сычев, Г. П. Тариков, Л. Г. Чубриков,  
О. Н. Шабловский, А. П. Шевлюков, П. А. Хило

Республика Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48

Телефон: +375 232 401 568. Факс: +375 232 479 165

E-mail: machin@gstu.by

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

### **Машиностроение и машиноведение**

<i>Бобарикин Ю. Л., Шишков С. В. Способ изготовления полосового антифрикционного металлофторопластового материала</i>	3
<i>Михневич А. В., Стасенко Д. Л. Некоторые вопросы форсирования по давлению аксиально-поршневых гидромашин</i>	10
<i>Туромша В. И., Довнар С. С., Туми эль-Мабрук Абужафер Али, Трусковский А. С. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри»</i>	15
<i>Василевич Ю. В., Остриков О. М. Метод расчета компонент тензора локализованной пластической деформации и тензора плотности дислокаций у границ некогерентного двойника</i>	29
<i>Михайлов М. И., Ромачков А. Н. Анализ статической прочности и точности координатного стола многоцелевого станка с вертикальным шпинделем</i>	37

### **Электротехника и энергетика**

<i>Зализный Д. И., Медведев К. М., Потапенко Н. В. Стенд для изучения диспетчерского управления в электрических сетях</i>	43
<i>Кротенок В. В., Рабская Ю. В. Техничко-экономическое обоснование выбора места расположения подстанции</i>	49
<i>Денисюк Ю. Ю. Вибродиагностирование электрических машин в условиях помех и неопределенностей</i>	57

<i>Захаренко В. С., Дорощенко И. В. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения</i>	66
<i>Гуминский А. Н. Повышение эффективности режимов работы двухтрансформаторной подстанции</i>	74
<b>Экономика и управление народным хозяйством</b>	
<i>Ивановская И. В., Драгун Н. П. Факторы возникновения и устойчивости ценовых соглашений на рынке</i>	82
<i>Пархоменко Н. В., Ермалинская Н. В. Теоретические и методологические аспекты эффективного функционирования интегрированных структур в АПК</i>	96
<i>Бердин А. Ю. Специфика стратегии распределительной политики предприятий промышленности строительных материалов</i>	104
<b>Хроника научной жизни</b>	112
<b>Резюме</b>	114

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований: по техническим наукам – машиностроение и машиноведение, материаловедение, энергетика (приказ ВАК РБ № 101 от 04.06.2005 г.); по экономическим наукам – экономика и управление промышленностью (приказ ВАК РБ № 26 от 02.02.2011 г.).
- Публикуемые материалы рецензируются.
- Мнение авторов статей не обязательно совпадает с позицией редколлегии.
- Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, разрешается только с согласия автора и издателя.
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00063  
для предприятий и организаций – 000632

**Редакторы: Н. Г. Мансурова, Н. В. Гладкова, А. В. Власов, А. Д. Федорова  
Компьютерная верстка М. В. Аникеенко**

**Подписано в печать 19.09.2011 г.**

**Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».**

**Ризография. Усл. печ. л. 14,41. Уч.-изд. л. 11,2.**

**Тираж 100 экз. Заказ № /61.**

**Издатель и полиграфическое исполнение:**

**Издательский центр**

**Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого.**

**ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.**

**246746, г. Гомель, пр. Октября, 48**

© Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2011

УДК 621.762

## **СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОСОВОГО АНТИФРИКЦИОННОГО МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВОГО МАТЕРИАЛА**

**Ю. Л. БОБАРИКИН, С. В. ШИШКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Быстрое развитие машиностроения выдвинуло задачу создания антифрикционных материалов, обладающих повышенной износостойкостью, низким значением коэффициента трения, способностью работать при высоких скоростях и больших нагрузках, а также в различных активных средах. Одним из таких материалов является металлофторопластовый композит. Материал представляет собой стальную ленту с напеченными на нее сферическими частицами бронзы. Поры бронзового слоя заполнены фторопластом с присадками, который играет роль смазывающего наполнителя [1].

Процесс производства данного материала разработан английской фирмой «Glacier» [2], существуют другие зарубежные производители аналогичного материала. Например, альтернативную продукцию выпускают российские предприятия, их технология основана на результатах исследований [3]. Процесс осуществляется на полуавтоматических линиях, в несколько этапов:

I. На первой линии поставляемая в рулонах стальная лента разворачивается и правится, обезжиривается, очищается кислотным травлением, электролитически покрывается медью, промывается, сушится и опять сворачивается в бунты.

II. На второй линии, включающей в себя конвейерную печь с восстановительной атмосферой, выполняются операции нанесения частиц бронзы и спекания пористого слоя.

III. На третьей линии производятся операции по заполнению пор фторопластом и калибровки прокаткой до требуемой толщины материала. В результате получают готовый материал в виде металлофторопластовой ленты (МФЛ). Фирма «Glacier» дополнительно наносит антикоррозионное оловянное покрытие на обратную сторону МФЛ.

### **Постановка задачи**

Приведенная известная технология эффективна при массовом производстве. При этом МФЛ выпускается только нескольких типоразмеров и имеет постоянные эксплуатационные характеристики. В настоящее время возникает потребность в подобном материале, который можно было бы выпускать малыми партиями с различными типоразмерами, конфигурацией, а также способностью работы при различных режимах.

В известной технологии изготовления металлофторопластового композита сферические частицы бронзы наносятся на стальную основу свободной насыпкой. После спекания образуется неравномерный слой бронзы с нерегулируемой общей пористостью порядка 30–35 %. Это определяет узкий диапазон рабочих характеристик материала, так как изменение общей пористости бронзового слоя приводит к изменению эксплуатационных свойств композита в целом. Так, увеличение общей пористости, а также увеличение числа открытых пор позволит ввести дополнительное количество

фторопласта, что увеличит количество антифрикционного наполнителя в зоне трения. Поэтому для совершенствования этой технологии предлагается использовать метод регулировки пористости бронзового слоя на основе введения в бронзовый слой дополнительных компонентов, образующих дополнительные поры.

В качестве способа нанесения бронзового слоя на стальную основу предложено использовать совместную прокатку порошковой шихты и стальной полосы. Применение данного способа позволит получить равномерный бронзовый слой и исключить неравномерность свойств композита.

### **Результаты исследований**

Результатом проведенных исследований стала разработка технологии мелкосерийного производства МФЛ с расширенными эксплуатационными характеристиками. Данный материал отличается от аналогов тем, что бронзовый слой наносится непосредственно на стальную полосу без применения промежуточного медного подслоя и имеет регулируемую пористость и выпускается в виде пластин разного размера, что расширяет эксплуатационные возможности МФЛ.

Технология изготовления МФЛ с расширенными эксплуатационными характеристиками состоит из следующих основных этапов:

#### *1. Подготовка стальной полосы.*

Состоит в удалении окалины, ржавчины с последующим обезжириванием поверхности. Удаление окалины и ржавчины осуществляется металлическими щетками. При этом на поверхность стальной полосы наносится микрорельеф, который способствует повышению адгезии далее наносимого бронзового слоя.

#### *2. Подготовка порошковой шихты.*

На этом этапе для регулировки пористости бронзового слоя в порошок бронзы вводятся порообразующие компоненты в определенных количествах, которые, удаляясь при спекании, способствуют образованию дополнительных пор в бронзовом слое. Количество дополнительных пор пропорционально. Готовится порошковая шихта смешиванием бронзового порошка с дополнительным компонентом. Лучшее качество пористого бронзового слоя (однородность пор) достигается применением порошков одинаковой фракции. Оптимальным вариантом является использование бронзового порошка марки Бр. ОФ-10-1 со сферическими частицами размером 0,1–0,16 мм. В качестве порообразующих компонентов могут применяться следующие вещества: некоторые соли аммония (углекислый аммоний, бикарбонат аммония, хлористый аммоний); парафин; хлорная медь; хлорное железо; оксид цинка.

Наиболее оптимальным является применение порошка хлористого аммония, так как он удаляется при спекании полностью (без остатка в порах бронзового слоя), а продукты его разложения активируют процесс спекания, что позволяет получать композит с высоким адгезионным взаимодействием между бронзовым слоем и поверхностью стальной полосы без применения промежуточного медного подслоя на поверхности полосы. Размеры гранул порошка хлористого аммония, а также его количество в шихте зависят от требуемой пористости бронзового слоя.

Содержание порообразующего компонента в шихте находится в пропорциональной зависимости от требуемой пористости бронзового слоя, однако оно не должно превышать 50 % от общего объема, так как при этом значительно ослабевают прочностные свойства бронзового слоя.

Полученная экспериментально зависимость (рис. 1) позволяет определить количество вводимого в шихту порообразователя для получения определенной пористости (П).

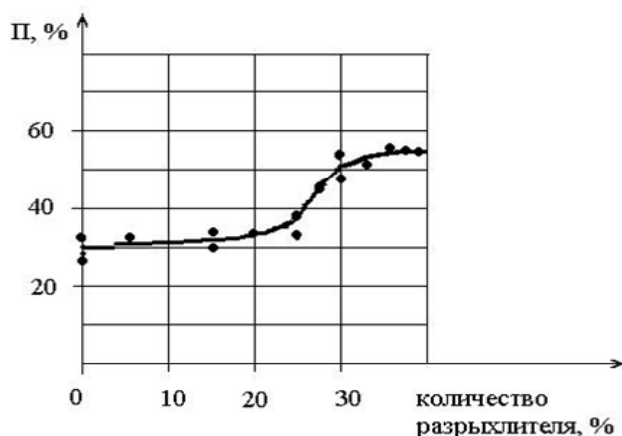


Рис. 1. Зависимость пористости бронзового слоя от содержания разрыхлителя (порообразователя) в шихте

### 3. Нанесение порошковой шихты на стальную полосу.

Для получения равномерного бронзового слоя (неровности недопустимы) в качестве способа нанесения применен метод накатки порошковой шихты на полосу (рис. 2).

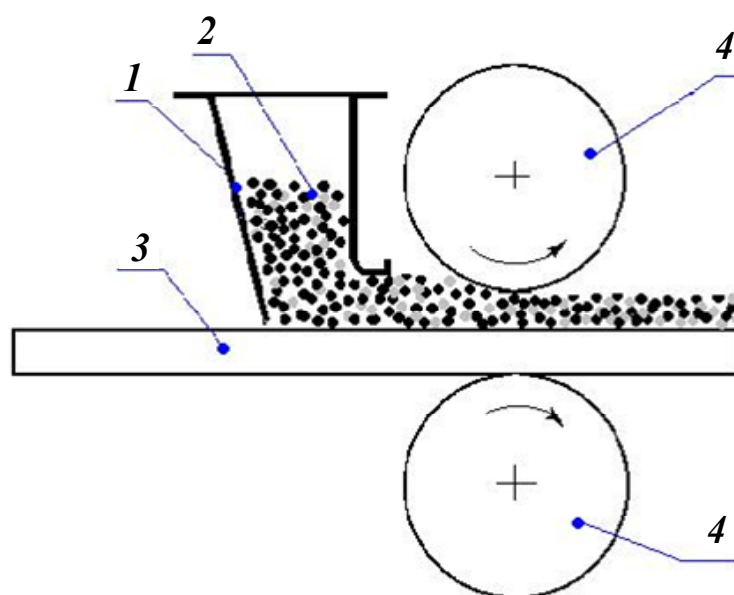


Рис. 2. Схема накатки порошковой шихты:  
 1 – бункер; 2 – порошковая шихта (бронза и разрыхлитель);  
 3 – стальная полоса; 4 – прокатные валки

Порошковая шихта 2 засыпается в бункер 1. Из бункера под действием силы тяжести порошок укладывается на стальную полосу 3 слоем определенной толщины. Далее полоса подается в прокатные валки 4. Накатка порошка осуществляется с минимальным обжатием для исключения пластической деформации частиц бронзы (зазор между валками устанавливается из условия минимального захвата полосы).

### 4. Спекание бронзового порошка.

Спекание проводится в среде защитного газа или в вакууме для исключения окисления спекаемых материалов. В качестве защитной среды могут применяться: водород, диссоциированный аммиак, конвертированный природный газ, эндотермический газ. Выбор защитной среды в значительной степени зависит от состава спе-

каемого изделия, типа печи, экономических факторов. Температурный интервал спекания выбирается по диаграмме состояния бронзового сплава. Рекомендуемый интервал 870–920 °С. Время выдержки в данном интервале температур варьируется в пределах 0,5–1 ч (меньшая выдержка для более высоких температур).

В процессе спекания удаляется разрыхлитель, частицы бронзы спекаются между собой и с поверхностью полосы. Получаемый полупродукт представляет собой стальную полосу с напеченным на нее пористым бронзовым слоем.

#### 5. Подготовка пасты фторопласта.

Для пропитки пористого бронзового слоя фторопластом готовится паста совместной коагуляцией водной суспензии фторопласта-4ДВ и спиртовой суспензии свинца, дисульфида молибдена (либо других наполнителей), обеспечивающих дополнительные свойства материала.

#### 6. Пропитка бронзового слоя пастой фторопласта.

Осуществляется способом вкатывания валками (рис. 3).

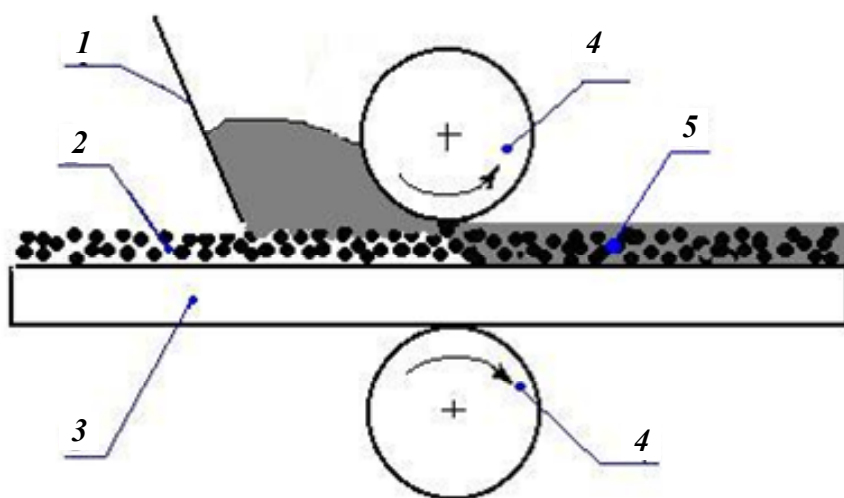


Рис. 3. Схема пропитки бронзового слоя пастой фторопласта: 1 – бункер с пастой; 2 – пористый бронзовый слой; 3 – стальная основа; 4 – прокатные валки; 5 – пористый слой, пропитанный фторопластом

Паста из бункера 1 подается на полосу и вместе с ней втягивается в зазор между валками 4. Воздух при этом последовательно вытесняется по пористому слою вперед, и поры при правильной дозировке заполняются на всю толщину пористого слоя. Вкатывание пасты осуществляется с небольшим обжатием частиц бронзы, при этом фторопласт проникает в поры, и некоторые из них закрываются, что не ухудшает рабочие свойства материала. При вкатывании паста впрессовывается в поры и образует поверхностный приработочный слой по всей длине полосы.

Паста, вкатанная в поры, высушивается при температуре около 100 °С.

#### 7. Спекание фторопласта.

Частицы фторопласта в порах и на поверхности бронзового слоя спекаются путем выдержки полос при температуре 380–400 °С не менее 20 мин.

#### 8. Калибровка и термообработка полосы.

После спекания фторопласта горячую полосу подвергают совместной закалке и калибровке. Осуществляется эта операция по схеме, представленной на рис. 4.

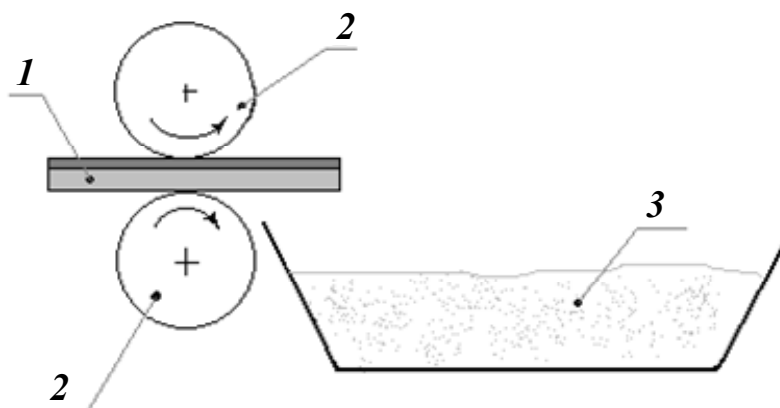


Рис. 4. Схема калибровки и закалки:  
1 – полоса; 2 – прокатные валки; 3 – ванна с водой

Горячая полоса 1 из печи подается в прокатные валки 2, зазор между которыми устанавливается согласно конечной толщине полосы. При прохождении между валками полоса частично охлаждается, сглаживаются образовавшиеся при спекании дефекты поверхностного слоя. После выхода из валков полоса попадает в ванну с водой 3, где быстро охлаждается до комнатной температуры, что обеспечивает закалку кристаллической структуры фторопласта.

После выполнения этих операций полоса представляет собой готовый антифрикционный материал, из которого в дальнейшем методом штамповки изготавливаются свертные втулки, упорные кольца и другие самосмазывающиеся подшипники.

Исследование микроструктуры полученного материала проводилось на приборе ПМТ-3. Были получены фотографии поперечных шлифов полосы, рабочей поверхности трения. На рис. 5 представлена микроструктура МФЛ российского производства, на которой отображены: стальная основа 1; медный подслой 2; сферические частицы бронзы 3; поры 4, заполненные фторопластом-4.

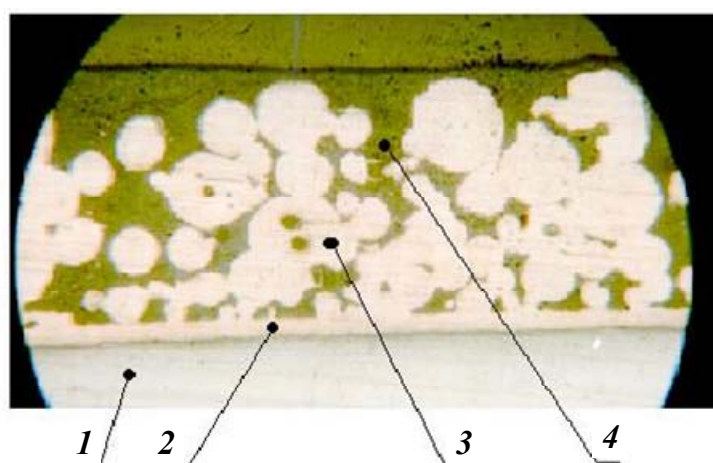


Рис. 5. Микроструктура МФЛ (x120):  
1 – стальная основа; 2 – медный подслой;  
3 – сферические частицы бронзы; 4 – поры

На рис. 6 представлена микроструктура полосы, полученной по приведенной выше разработанной технологии. Следует отметить, что в полученном материале отсутствует медный подслой, а также увеличена пористость бронзового слоя, что по-

зволило ввести дополнительное количество смазывающего материала – фторопласта с наполнителем. Пористость данного образца составляет около 40 %.

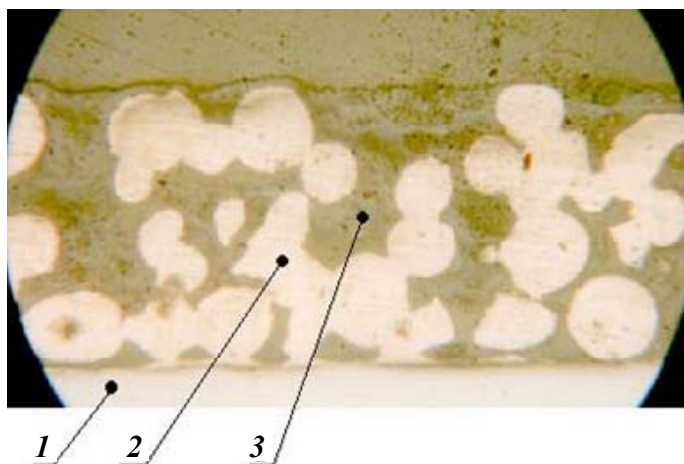


Рис. 6. Структура материала (x120):  
1 – стальная полоса; 2 – частицы бронзы;  
3 – поры, заполненные фторопластом с наполнителем

Предлагаемая технология позволяет получать материал с регулируемой пористостью бронзового слоя в пределах 25–50 %. Более высокая пористость приводит к значительному ослаблению прочностных свойств материала.

Использование разработанной технологии дает возможность получения материала с тонким рабочим слоем (0,17 мм), который может применяться в узлах, требующих повышенной точности установки трущихся поверхностей. Структура такого материала представлена на рис. 7. При его изготовлении на стальную основу наносится бронзовый слой толщиной в одну частицу порошка, что позволяет получить рабочий слой повышенной точности.

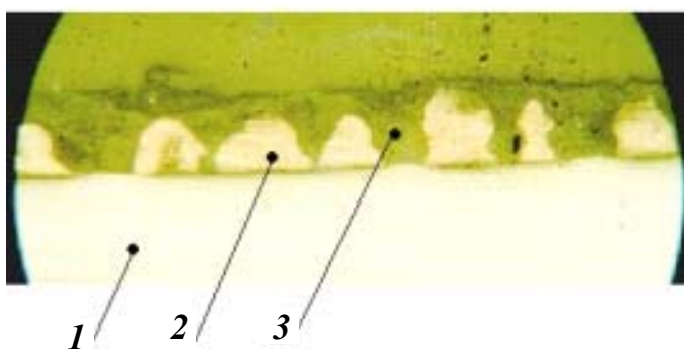


Рис. 7. Структура материала (x120):  
1 – стальная полоса; 2 – частицы бронзы;  
3 – поры, заполненные фторопластом с наполнителем

Из вышеизложенного следует, что предлагаемая технология позволяет производить МФЛ с различной пористостью бронзовой матрицы, что делает возможным введение различного количества антифрикционного наполнителя (от 25 до 50 %) в поры бронзового слоя.

Для проведения испытаний полученного материала на износ и долговечность были изготовлены подшипники скольжения типа свертных втулок с внутренним диаметром  $d = 6$  мм и шириной  $b = 9$  мм. Подшипники работали в паре с валом из закаленной



стали 45 (твердость порядка 50 HRC) по схеме «вращающийся вал – неподвижная втулка». Согласно рекомендациям [2], нагружение подшипника выбиралось из условия  $PV = 0,5$  МПа · м/с. В качестве «тяжелого» режима нагружения подшипника принят режим с контактным давлением  $p = 3,17$  МПа и скоростью скольжения  $V = 0,157$  м/с. В качестве «легкого» режима нагружения подшипника принят режим с контактным давлением  $p = 1,10$  МПа и скоростью скольжения  $0,450$  м/с.

Были получены следующие результаты:

Срок службы подшипников, изготовленных из материала со средней пористостью 30 %, а также из МФЛ составил:

- 200 ч при  $p = 3,17$  МПа и  $V = 0,157$  м/с;
- 300 ч при  $p = 1,10$  МПа и  $V = 0,450$  м/с.

Срок службы подшипников, изготовленных из материала с пористостью 48 %, составил:

- 150 ч при  $p = 3,17$  МПа и  $V = 0,157$  м/с;
- 450 ч при  $p = 1,10$  МПа и  $V = 0,450$  м/с.

Срок службы подшипников, изготовленных из МФЛ российского производства, составил:

- 200 ч при  $p = 3,17$  МПа и  $V = 0,157$  м/с;
- 300 ч при  $p = 1,10$  МПа и  $V = 0,450$  м/с.

Приведенные результаты испытаний на трение показали, что полученный материал с пористостью около 30 % имеет эксплуатационные характеристики, близкие к аналогам. Полученный материал с пористостью бронзовой матрицы 48 % уступает по своим характеристикам МФЛ российского производства при тяжело нагруженных режимах работы, что объясняется снижением прочностных свойств рабочего слоя. Однако при малых удельных давлениях и повышенных скоростях скольжения срок службы подшипников из материала с пористостью бронзовой матрицы 48 % значительно превосходит срок службы аналогов вследствие наличия избыточного количества твердой смазки.

### Заключение

Разработанная технология расширяет диапазон применения металлофторопластового материала. Она позволяет изготавливать этот вид материала с разными эксплуатационными характеристиками и размерами без существенных изменений в технологии его получения, что повышает эффективность его мелкосерийного производства.

Полученный металлофторопластовый материал с увеличенной пористостью бронзового слоя до 48 % рекомендуется как более эффективный для изготовления подшипников скольжения, работающих в условиях легкого нагружения. Материал можно изготавливать в виде полос разных типоразмеров без необходимости перенастройки оборудования под каждый типоразмер полос.

### Литература

1. Чичинадзе, А. В. Полимеры в узлах трения машин и приборов : справочник / А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1988.
2. Семенов, А. П. Металлофторопластовые подшипники / А. П. Семенов, Ю. Э. Савинский. – М. : Машиностроение, 1976.
3. Семенов, А. П. Технология изготовления и свойства содержащих фторопласт антифрикционных материалов / А. П. Семенов. – М. : Машиностроение, 1963.

УДК 621.225.7+621.653

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФОРСИРОВАНИЯ ПО ДАВЛЕНИЮ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ ГИДРОМАШИН

**А. В. МИХНЕВИЧ, Д. Л. СТАСЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Одной из актуальных задач современного гидромашиностроения является увеличение мощности объемных гидромашин путем их форсирования по давлению. При этом улучшаются габаритно-весовые характеристики объемного гидропривода, что позволяет более широко использовать его в транспортных механизмах. Разработаны объемные гидронасосы и гидродвигатели, работающие на давлениях до 40 МПа, испытываются гидромашин на давления до 60 МПа, имеется тенденция к дальнейшему повышению рабочих давлений. Однако следствием повышения давления является увеличение напряжений и, соответственно, деформаций, значительно усложняющих работу гидромашин.

Решение столь сложных задач, как значительное повышение рабочих давлений объемного гидропривода, требует более глубокого теоретического анализа работы гидромашин, позволяющего определить основные направления экспериментальных исследований и опытно-промышленных разработок.

Одним из основных элементов аксиально-поршневых гидромашин является узел распределения рабочей жидкости. Этот узел в большей мере, чем другие узлы, определяет надежность и долговечность гидромашин, их чувствительность к загрязнению рабочей жидкости, шумовую характеристику и способность гидромашин работать на высоких давлениях.

Торцевой распределитель аксиально-поршневых гидромашин имеет различное конструктивное исполнение, и в общем многообразии этих устройств можно выделить сферический (рис. 1) и плоский (рис. 2) распределители.

Внешняя конфигурация распределительного диска, как показывает практика эксплуатации гидромашин при невысоких давлениях, не обеспечивает каких-либо эксплуатационных преимуществ, не вносит существенных изменений в методику расчета распределителей, не снижает требований к качеству их обработки. Применение сферического распределителя обеспечивает некоторую компенсацию технологических и монтажных неточностей; поэтому последние получили несколько большее распространение в аксиально-поршневых гидромашин, выпускаемых отечественной промышленностью.

### **Основная часть**

Существенным для нормальной работы аксиально-поршневых гидромашин является обеспечение устойчивого режима гидродинамического (жидкостного) трения в зазоре между контактирующими поверхностями распределительного диска и подвижного блока цилиндров при минимальных утечках рабочей жидкости. То есть величина зазора должна быть больше величины суммарной шероховатости контактных поверхностей.

При нарушении режима жидкостного трения в распределительном узле резко возрастает трение и, соответственно, тепловыделение и износ, что при определенных условиях может привести к выходу гидромашины из строя.

При форсировании аксиально-поршневых гидромашин по давлению возрастает напряженность работы распределительного узла, поэтому оптимизация его конструктивного исполнения является актуальной задачей.

При высоких давлениях рабочей жидкости распределительный диск испытывает значительную гидростатическую нагрузку, следствием чего являются:

а) относительно большая величина трения на взаимодействующих поверхностях распределительного узла;

б) большие механические напряжения в металле распределительного диска.

Кроме того, существенно усложняет работу распределительного узла различие в коэффициентах температурного расширения материалов распределительного диска и блока цилиндров (при форсировании по давлению тепловыделение в распределительном узле существенно повышается).

Величина момента трения в распределительном узле (в режиме гидродинамического трения) определяется по формуле [1]:

$$M_p = \frac{\pi\mu\omega}{2h}(R_4^4 - R_1^4), \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости при давлении нагнетания;  $h$  – величина зазора между контактными поверхностями распределительного узла;  $\omega$  – частота вращения вала гидромашины (блока цилиндров);  $R_1$ ,  $R_4$  – радиусы соответствующих внутренних и наружных кромок уплотнительных поясков распределительного диска (рис. 1).

Таким образом, величина момента трения в распределительном узле (в режиме гидродинамического трения) обратно пропорциональна величине зазора  $h$  между контактными поверхностями распределительного диска и блока цилиндров.

Как показали проведенные исследования [2], увеличение давления рабочей жидкости  $P_0$  приводит к уменьшению зазора  $h$ :

$$h = k \sqrt{\frac{\omega\mu}{P_0}}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности; зависит, в частности, от геометрических размеров распределительного диска.

Зависимость (2) в сочетании с зависимостью вязкости рабочей жидкости от давления  $p$ :

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p}, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости при атмосферном давлении;  $\alpha$  – пьезокоэффициент вязкости рабочей жидкости, обуславливает существенное возрастание трения в распределительном узле при повышении рабочего давления  $P_0$ .

Закономерность (2) при определенных условиях накладывает ограничения на возможность форсирования аксиально-поршневых гидромашин по давлению условием:  $h \geq 2R_z$ , где  $R_z$  – шероховатость контактирующих поверхностей распределительного узла.

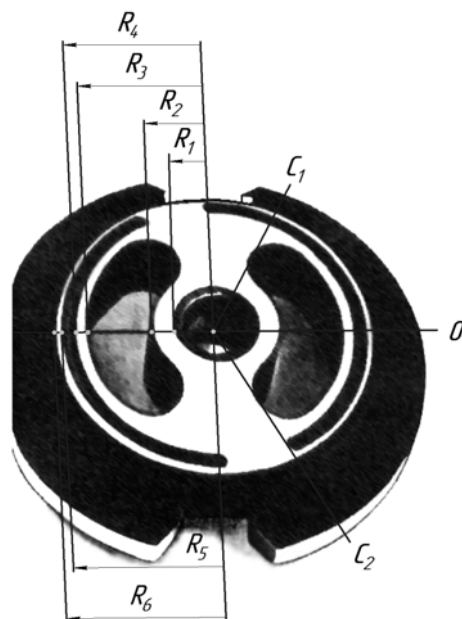


Рис. 1. Сферический распределительный диск аксиально-поршневой гидромашины 207.25

$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  на рис. 1 – радиусы внутренних и наружных кромок, соответственно, первого, второго и третьего уплотнительных поясков. Между радиусами  $R_2$  и  $R_3$  расположены 2 распределительных серповидных окна.

Однако этот фактор по-разному проявляется при плоском и сферическом распределительных дисках.

Большие боковые поверхности и значительная длина серповидных окон у многих конструкций распределительных дисков при высоких давлениях рабочей жидкости приводит к существенным деформациям в зоне нагнетательных серповидных окон.

Очевидно, наиболее существенной деформацией будет упругая деформация изгиба внешнего кольца распределительного диска в секторе зоны нагнетания  $C_1OC_2$  (рис. 1).

Количественную оценку этой деформации можно получить, если упрощенно считать внешнее кольцо распределительного диска  $B$  в секторе  $C_1OC_2$  как стержень, свободно лежащий на двух опорах, но подверженный действию распределенной нагрузки (давлению рабочей жидкости) со стороны нагнетательного серповидного окна. Считать концы этого стержня жестко заземленными не представляется целесообразным, так как они фактически не препятствуют развитию деформации изгиба.

Величина упругой деформации изгиба  $f$  (учитывая, что при вычислении деформаций изгиба кривизной стержня можно пренебречь) будет равна [3]:

$$f = \frac{ql^3x}{24EJ} \left( 1 - 2\frac{x^2}{l^2} + \frac{x}{l} \right), \quad (4)$$

где  $l$  – длина серповидного окна;  $x$  – криволинейная координата точки внешней поверхности серповидного окна;  $J$  – момент инерции сечения внешнего кольца распределительного диска (рис. 1) относительно нейтральной оси;  $E$  – модуль упругости материала распределительного диска;  $q$  – величина распределенной нагрузки, действующей на внешнюю поверхность нагнетательного серповидного окна; в данном случае:

$$q = P_0 b,$$

где  $b$  – высота внешней поверхности нагнетательного серповидного окна;  $P_0$  – давление нагнетания рабочей жидкости.

Максимальный прогиб внешнего кольца распределительного диска в секторе нагнетания:

$$f_{\max} = \frac{5P_0bl^4}{386EJ}. \quad (5)$$

Для аксиально-поршневой гидромашины 207.25:  $E = 2,1 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ ,  $l = 57$  мм,  $J = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ , при  $P_0 = 36$  МПа расчетное значение  $f_{\max} = 26$  мкм.

Экспериментальные измерения, выполненные на этой же гидромашине при  $P_0 = 36$  МПа, дали примерно такую же величину прогиба внешнего кольца распределительного диска: ( $f_{\max} \approx 15 \div 25$  мкм). Это свидетельствует об адекватности принятой модели напряженного состояния распределительного узла аксиально-поршневых гидромашин.

Для сферических распределительных дисков такой существенный прогиб приводит к резкому локальному уменьшению зазора между распределительным диском и блоком цилиндров в секторе нагнетания.

Для гидромашины 207.25 относительная разность высот внешней поверхности нагнетательного окна составляет 0,18; поэтому уменьшение зазора вследствие прогиба ( $f_{\max} = 26$  мкм) составит  $4 \div 5$  мкм и примерно равно величине зазора между контактными поверхностями распределительного узла.

### Заключение

Таким образом, деформационный прогиб внешнего кольца сферического распределительного диска при достаточно высоких давлениях может полностью свести на нет разделительный зазор между контактирующими поверхностями распределительного узла. В этом случае режим гидродинамического трения нарушается, что сопровождается повышением шума, вибрацией, локальным перегревом деталей распределительного узла. При определенных условиях возможно образование задиров контактных поверхностей и выход гидромашины из строя. Эти явления наблюдались при испытаниях аксиально-поршневой гидромашины 207.25 при давлениях до 60 МПа.

Из приведенных рассуждений можно сделать вывод о том, что сферическая конфигурация распределительного диска накладывает принципиальные ограничения на возможность существенного форсирования аксиально-поршневой гидромашины по давлению.

Из выражения (5) следует, что величина прогиба внешнего кольца распределительного диска пропорциональна длине серповидного окна в 4-й степени. То есть уменьшением длины серповидного окна или другими конструктивными усовершенствованиями, повышающими жесткость внешнего кольца (например, членением серповидных окон перемычками), можно в определенной мере повысить допустимое рабочее давление.

Как показывает анализ, фактор деформации для сферических распределительных дисков является основным, ограничивающим повышение рабочего давления.

Для плоского распределительного диска деформации в распределительном диске не оказывают столь существенного влияния на величину зазора, т. е. плоский распределительный диск в определенной степени свободен от данного недостатка. Поэтому при давлениях свыше 40 МПа предпочтительно использование плоского рас-

пределительного диска в аксиально-поршневых гидромашинах. Одним из основных факторов, ограничивающих повышение рабочего давления в аксиально-поршневой гидромашине с плоским распределительным диском, является уменьшение смазочного слоя вследствие его гидростатического сжатия [1].

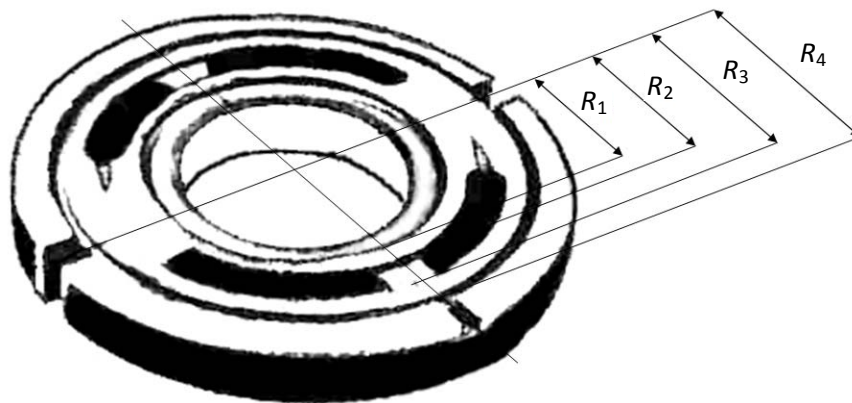


Рис. 2. Распределительный диск с плоской формой рабочей поверхности.  
 $R_1, R_2, R_3, R_4$  – радиусы кромок, соответственно, внутреннего и наружного уплотнительных поясков. Между уплотнительными поясками располагается серповидное окно

### Литература

1. Михневич, А. В. Анализ динамики распределительных узлов аксиально-поршневых гидромашин / А. В. Михневич // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – Гомель, 2002. – № 3–4. – С. 5–7.
2. Михневич, А. В. О величине зазора в распределительном узле аксиально-поршневых гидромашин / А. В. Михневич, Ю. А. Андреев // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. IV МНТК. – Гомель, 2002.
3. Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – М. : Физматлит, 2008. – С. 384.

Получено 30.03.2011 г.

УДК 621.9.011:517.962.1

## АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ ПОДВИЖНОГО ПОРТАЛА ПРОДОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ТИПА «ГЕНТРИ»

**В. И. ТУРОМША, С. С. ДОВНАР,  
ТУМИ ЭЛЬ-МАБРУК АБУЖАФЕР АЛИ**

*Учреждение образования «Белорусский национальный  
технический университет», г. Минск*

**А. С. ТРУСКОВСКИЙ**

*ОАО «Станкостроительный завод «МЗОР», г. Минск,  
Республика Беларусь*

### Введение

Особенностью компоновки продольно-фрезерных станков с подвижным порталом типа «Гентри» является неподвижный стол и перемещающийся вдоль него портал, несущий фрезерно-расточную бабку [1]. Такая компоновка по сравнению с классической, включающей подвижный стол, позволяет уменьшить габариты станка.

Общий вид несущей системы станка представлен на рис. 1. Портал состоит из траверсы, закрепленной на двух стойках, которые смонтированы на сани, перемещающихся по двум параллельным станинам. Бабка состоит из каретки и ползуна, в котором встроен привод вращения основного вертикального шпинделя станка.

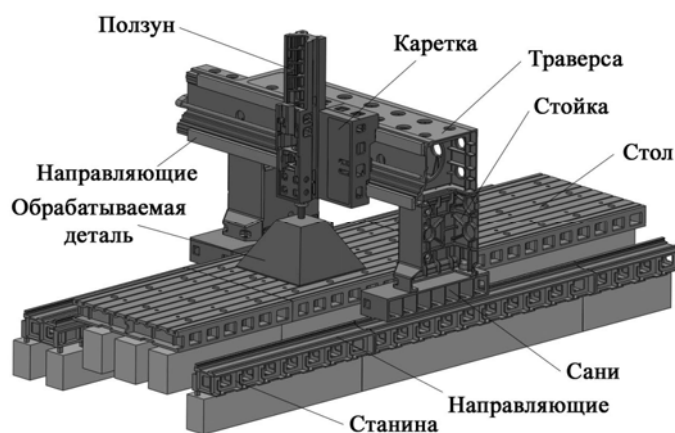


Рис. 1. Несущая система продольно-фрезерного станка с подвижным порталом

Станкостроительное предприятие ОАО «МЗОР» впервые начало осваивать производство таких высокопроизводительных тяжелых продольно-фрезерных станков [2]. Поэтому задача обеспечения требуемой жесткости несущей системы является весьма актуальной. Для ее решения использованы методы математического моделирования [3], которые позволяют не только выявить слабые элементы конструкции, но и осуществить виртуальные испытания ряда вариантов и выбрать наиболее эффективные из них. Экспериментальным путем решение такой задачи невозможно из-за условий единичного производства, а также высоких материальных затрат, связанных с большими габаритами и массой станков.

### Методика моделирования

Настоящая работа ориентирована главным образом на виртуальные испытания портала станка, включая моделирование с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [3]. Благодаря наличию вертикальной плоскости симметрии станка для упрощения геометрической и конечно-элементной модели далее использована половинная модель портала (рис. 2, а).

Траверса, стойка и сани являются пустотелыми чугунными отливками с развитым внутренним оребрением. При создании их геометрических моделей было предусмотрено также заполнение внутренних полостей материалом, т. е. вставки (рис. 2, б), сопрягающиеся с отливками без зазоров и интерференции. В реальности они могут быть созданы заполнением отливок полимербетоном – относительно распространенным в станкостроении материалом [4]. Полимербетон известен хорошим сцеплением с емкостью, в которую его заливают, удовлетворительной жесткостью, высокими демпфирующими свойствами.

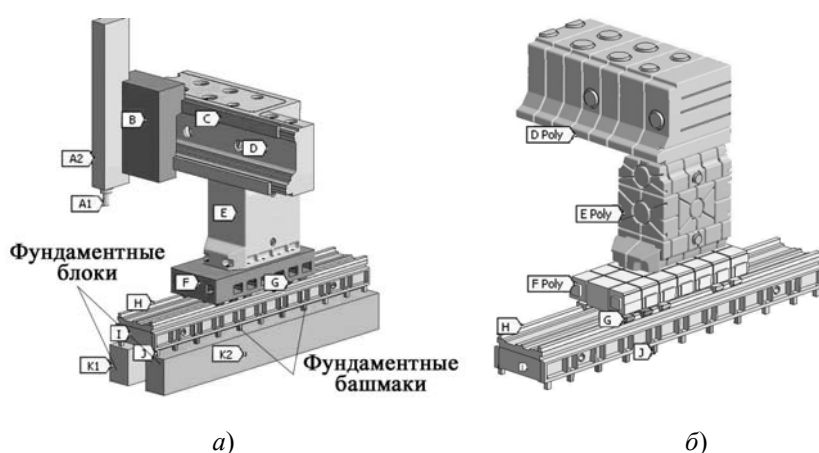


Рис. 2. Половинная модель портала станка (а) и полимербетонные вставки (б)

Характер деформации станка под нагрузкой уже выяснялся в предыдущих исследованиях [5], [6]. Цель данной работы – оценка жесткости именно портала и влияния на нее составляющих деталей. Поэтому навесное оборудование (шпиндельный узел, ползун и каретка) рассматривалось упрощенно как жесткие монолитные тела.

Основная методическая идея работы заключается в поочередном варьировании жесткости деталей портала. Сначала моделировался базовый вариант, максимально приближенный к реальности. Определялись его деформации под тестовой нагрузкой. Тем самым оценивается базовая жесткость портала станка  $R$  (и, как обратная величина, податливость  $K = 1/R$ ). Жесткость определяется как  $R = F/u$ , где  $F$  – приложенная к шпинделю сила;  $u$  – перемещение на конце шпинделя.

Затем жесткость каждой детали портала изменялась двукратно в большую и в меньшую сторону и моделирование повторялось. Это позволяло выяснить важность детали в формировании общей жесткости несущей системы станка и установить чувствительность жесткости всего станка к жесткости именно этой детали. В МКЭ-модели управление жесткостью производилось через умножение модуля упругости материала детали  $E$  на коэффициент варьирования жесткости  $a_{вж}$ . В реальности двукратного изменения жесткости можно достичь утолщением или утончением вдвое стенок отливки. Кроме того, подъем жесткости примерно вдвое происходит при замене чугунной отливки сварной стальной деталью.

Кроме траверсы, стойки и саней, варьирование жесткости производилось также для трех нижележащих деталей – направляющих качения, станины, фундаментных



башмаков. Именно эти шесть деталей образуют портал станка. Направляющие качения для каждой стойки включают 2 комплекта из 1 рельса и 5 опор, а комплект опор станины включает 40 башмаков.

Коэффициент  $a_{вж}$  обычно принимал значения  $1/4, 1/2, 1, 2, 4$ . Для направляющих качения и фундаментных башмаков  $a_{вж}$  варьировали от  $1/16$  до  $2$ .

Портал отображается последовательной цепью из звеньев жесткости (рис. 3). Каждое звено представляет деталь или комплект деталей: бабку (податливость  $k_{б\text{аб}}$ ), траверсу ( $k_{т\text{р}}$ ), стойку ( $k_{с}$ ), сани ( $k_{с\text{ан}}$ ), комплект направляющих качения ( $k_{н\text{к}}$ ), станину (три секции в сборе –  $k_{с\text{т}}$ ), комплект фундаментных башмаков ( $k_{б\text{аш}}$ ). Именно в таком порядке передается усилие со шпинделя ( $A1$  на рис. 2,  $a$ ) на фундамент. Любому перечисленному звену  $i$  вместе с податливостью  $k_i$  соответствует жесткость  $r_i = 1/k_i$ . Сумма податливостей звеньев дает податливость всей системы

$$K = k_{т\text{р}} + k_{с} + k_{с\text{ан}} + k_{н\text{к}} + k_{с\text{т}} + k_{б\text{аш}} + k_{\text{ост}} = \sum k_i, \quad (1)$$

где  $k_{\text{ост}}$  – сумма податливостей бабки  $k_{б\text{аб}}$ , направляющих каретки, рельсов направляющих стойки, фундаментных блоков.

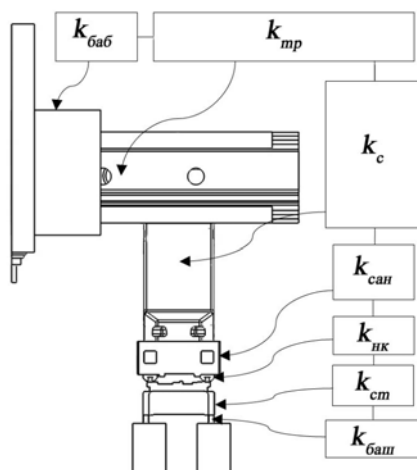


Рис. 3. Схема звеньев жесткости для половинной модели портала станка

Согласно закону Гука, справедливо уравнение

$$u = KF = \left( \sum k_{i-1} + k_i \right) F = \left( \sum k_{i-1} + \frac{1}{r_i} \right) F, \quad (2)$$

где  $\sum k_{i-1}$  – сумма податливостей всех звеньев, кроме некоторого  $k_i$ .

Поскольку в (2) жесткость  $r_i$  стоит в знаменателе дроби, то получается, что перемещение шпинделя и податливость станка  $K$  изменяются по гиперболической зависимости при изменении жесткости любого звена. Рассмотрим это на примере направляющих качения и башмаков.

Каждой опоре направляющих качения по каталогу соответствует жесткость примерно  $3000 \text{ Н/мкм}$ . Жесткость может быть изменена в несколько раз переходом на другой типоразмер (в пределах несущей способности) и регулированием натяга. Для фундаментного башмака была сделана с помощью МКЭ оценка его жесткости с учетом контактных эффектов в клиновом соединении и на опорных поверхностях. Оказалось, что в зависимости от перекосов жесткость меняется от нескольких сотен до десятков тысяч  $\text{Н/мкм}$ .

Получается, что в МКЭ-моделировании портала жесткость опор направляющих качения и башмаков можно варьировать в широком диапазоне без отступления от реальности. Базовая величина жесткости для обоих объектов принята одинаковой  $r_{нк} = r_{баш} = 3000$  Н/мкм, диапазон изменения 187,5–6000 Н/мкм. Обе жесткости влияют на вертикальное перемещение шпинделя  $u_z$  под вертикальной тестовой нагрузкой  $F_z = 1000$  Н по гиперболической зависимости (рис. 4). Обе кривые близки друг к другу. На каждой есть три характерных участка. На индифферентном участке 3 жесткость опоры или башмака почти не влияет на перемещение шпинделя (податливость портала). Это происходит, когда податливость опоры или башмака намного меньше, чем сумма податливостей остальных деталей. В формуле (2) выполняется неравенство  $1/r_i < \sum k_{i-1}$ .

Для активного участка 1 справедливо соотношение  $1/r_i > \sum k_{i-1}$ , т. е. податливость объекта (опоры качения или башмака) намного больше, чем у остальных деталей, и он в основном определяет податливость портала.

Участок 2 является переходным. Податливости всех деталей сопоставимы и  $1/r_i \approx \sum k_{i-1}$ .

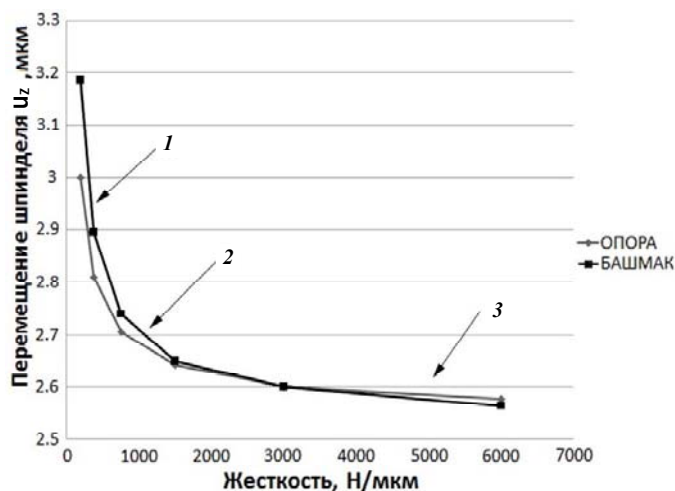


Рис. 4. Влияние жесткости опор направляющих качения и фундаментных башмаков на перемещение шпинделя

Понятно, что жесткость детали надо выбирать такой, чтобы она соответствовала индифферентному или, по крайней мере, переходному участку гиперболы жесткости. На индифферентном участке конкретная жесткость детали не важна. Ее нет смысла увеличивать, так как это почти не влияет на жесткость системы. Например, подъем жесткости опоры качения до 6000 Н/мкм (вдвое больше базовой величины) уменьшает перемещение на шпинделе только на 1,4 %. Аналогичный эффект наблюдается и для башмака.

Жесткость опоры и башмака можно даже уменьшить примерно до 400 Н/мкм ( $a_{вж} = 1/8$ ). Податливость портала возрастет при этом не более чем на 10 %. Дальнейшее снижение жесткости недопустимо, так как начинается активный участок гиперболы жесткости.

Итак, предварительно можно сделать вывод, что существующие опоры направляющих качения и фундаментные башмаки вполне достаточны по жесткости и не требуют первоочередной модернизации.

Варьирование модуля упругости детали портала позволяет численно оценить ее жесткость  $r_i$  (податливость  $k_i$ ) в рамках схемы на рис. 3. Пусть МКЭ-расчет показал перемещение  $u_1$  на шпинделе для силы  $F$  и некоторой, пока неизвестной, податливости звена  $k_i$ . Тогда, согласно (2):

$$u_1 = (\sum k_{i-1} + k_i)F. \quad (3)$$

Уменьшим наполовину модуль упругости и, соответственно, удвоим податливость. При повторении расчета получим перемещение

$$u_2 = (\sum k_{i-1} + 2k_i)F. \quad (4)$$

Зная из МКЭ-расчетов конкретные величины  $u_1$  и  $u_2$ , находим  $k_i$  по формуле, вытекающей из (3) и (4):

$$k_i = \frac{u_2 - u_1}{F}. \quad (5)$$

Аналогичную оценку можно сделать при уменьшении податливости наполовину. Среднеарифметическое оценок дает близкий к реальности результат.

#### Исходные данные для моделирования

Детали портала представляют собой литые конструкции из серого чугуна марки СЧ 20. Для расчетов свойства чугуна приняты следующими:

- модуль упругости  $E = 110$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,28$ ;
- плотность  $\rho = 7200$  кг/м<sup>3</sup>.

Масса траверсы (в половинной модели) составила 4085 кг, стойки – 1956 кг, сани – 2351 кг, станины – 3032 кг для каждой секции.

Для стальных деталей (направляющие на траверсе и рельсы на станине) принято:

- модуль упругости  $E = 200$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ;
- плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>.

Каретка и ползун моделировались как жесткие монолитные тела, способные передавать усилия. Поэтому им назначен модельный материал, модуль упругости которого равен модулю упругости стали. Его плотность подобрана так, чтобы масса суппорта и ползуна в половинной модели была равна 2500 кг. Это соответствует реальному 5-тонному суппорту в сборе.

Модельные материалы направляющих качения и фундаментных башмаков подобраны таким образом, чтобы отдельно взятые направляющая и башмак имели в базовом варианте жесткость по 3000 Н/мкм.

Для полимербетонных вставок в траверсу (6396 кг), колонну (1537) и сани (1314 кг) принято:

- модуль упругости  $E = 30$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,18$ ;
- плотность  $\rho = 2300$  кг/м<sup>3</sup>.

Такие же механические свойства назначены бетонным фундаментным блокам под станком. Вспомогательные МКЭ-расчеты показали, что упругий отклик блоков примерно эквивалентен размещению под фундаментными башмаками дополнительных пружин жесткостью 2500–3500 Н/мкм.

### Компьютерная модель портала

На рис. 2, а представлена трехмерная модель портала. Навесное оборудование (шпиндельный узел  $A1$  с ползуном  $A2$  на каретке  $B$ ) рассматриваются как жесткие монолитные тела. Каретка через направляющие  $C$  закреплена на траверсе  $D$ . Траверса опирается на стойку  $E$  и сани  $F$ . Сани движутся по рельсам  $H$  с помощью направляющих качения  $G$ . На каждой из двух рельс находится по 5 опор. Рельсы закреплены на станине  $I$  (на рисунке условно показана только средняя секция составной станины). Станина опирается на два ряда регулируемых клиновых фундаментных башмаков  $J$ . На рис. 2, а они представлены условно в виде прямоугольных стержней над рядами фундаментных блоков  $K1$  и  $K2$ . Эти бетонные блоки заливают в пазах фундамента, который не моделируется.

На рис. 2, б в отсутствие отливок показаны вставка в траверсу « $D Poly$ », вставка в стойку « $E Poly$ » и вставка в сани « $F Poly$ ». Остальные обозначения соответствуют рис. 2, а. Ниже приведены результаты расчетов как с «включенными», так и с «выключенными» полимербетонными вставками.

МКЭ-моделирование производилось в статической постановке. Модель считалась линейно-упругой. На контактах между деталями был установлен режим полного скрепления, без проскальзывания и трения движения. Это скрепление, в частности, заменяло привода подачи станка. Они считались заблокированными.

Контактная податливость не учитывалась. Отсутствовали геометрические нелинейности модели и физические нелинейности материалов. Сетка была построена по 3D-модели из достаточно точных гексаэдрических и тетраэдрических конечных элементов с квадратичной аппроксимацией перемещений. МКЭ-модель включала около 450000 конечных элементов и примерно 2,2 млн степеней свободы.

На рис. 5, а представлена схема закрепления половинной модели портала (вид сзади и снизу). Нижние поверхности фундаментных блоков жестко закреплены ( $FIX$ ). В срединном сечении на поверхности траверсы и суппорта средствами МКЭ наложены условия симметрии ( $SYM$ ). Смоделированы четыре случая нагружения: тестовая сила  $F_Z = 500$  Н действует на шпиндель в вертикальном направлении  $Z$  (направлена вверх) (1); сила  $F_X = 500$  Н действует на шпиндель в продольном направлении  $X$  (2); сила  $F_Y = 500$  Н действует на шпиндель в поперечном направлении  $Y$  (в срединном сечении условия симметрии заменены на условия антисимметрии) (3); станок нагружен собственным весом, сила тяжести действует по направлению  $Z$  вниз (4).

Все тестовые силы приложены к половинной модели портала. Поэтому ниже при оценке жесткости и податливости портала и его деталей полагается, что любая тестовая сила равна 1000 Н. Направление, в котором вдоль данной оси  $X$ ,  $Y$  или  $Z$  действует тестовая сила, не принципиально, так как модель линейна. Первые три случая нагружения соответствуют действию стандартных компонент силы резания. Четвертый случай отражает статическое состояние станка.

### Моделирование портала при нагружении вертикальной силой

На рис. 5, б представлена картина деформации портала под действием силы  $F_Z$  для базового варианта жесткости деталей. Числа на этом и последующих рисунках станка указывают перемещения в микрометрах, в данном случае – вертикальные. Фундаментные блоки под порталом всегда моделируются, но могут быть не показаны для лучшего обозрения конструкции.

Упругой деформации подвергаются все части портала. На траверсе хорошо заметно кручение вокруг ее оси (поперечное направление  $Y$ ). Изгиб визуально представляется менее существенным.

У стойки прямоугольные формы переходят в трапецевидные. Численные отметки 0,56 мкм и 0,27 мкм показывают, что передняя сторона стойки вытягивается вверх сильнее (на 0,29 мкм), чем задняя (0,26 – 0,1 = 0,16 мкм). В основном это обусловлено податливостью носка стойки (выступ передней стороны над отметкой 0,27 мкм).

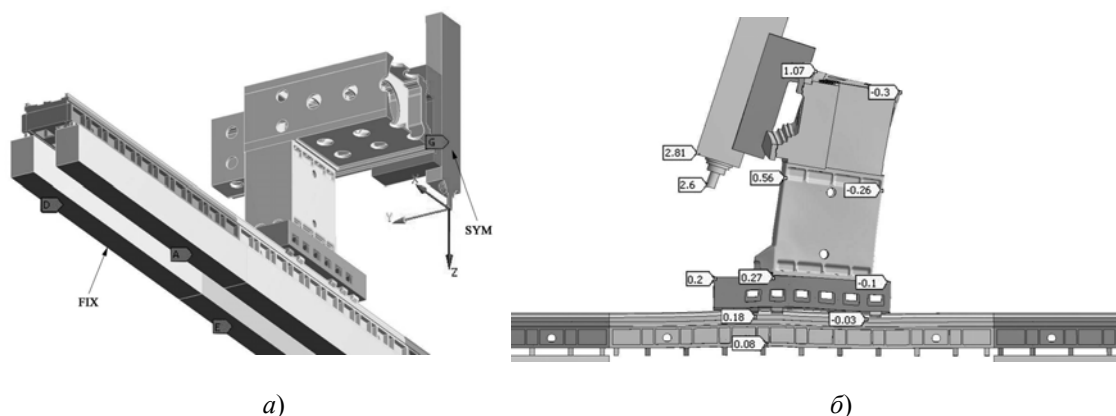


Рис. 5. Схема закрепления модели (а) и деформации портала при нагружении вертикальной силой  $F_z$  (б)

Сани и станина изгибаются вверх и вниз синусоидально. В целом портал подвергается повороту по часовой стрелке. Ось шпинделя отклоняется от вертикали на угол  $\alpha_{XZ}$ . Вертикальное перемещение шпинделя составляет  $u_z = 2,6$  мкм и во многом обусловлено указанным поворотом.

Вертикальная жесткость портала составляет –  $R_z = F_z / u_z = 1000 / 2,6 = 385$  Н/мкм. Это небольшая величина, особенно если учесть, что суппорт и шпиндельный узел смоделированы как стилизованные стальные монолиты.

Результаты варьирования жесткости литых деталей портала приведены на рис. 6, а (варьирование опор и башмаков рассмотрено выше). Видно, что вертикальное перемещение  $u_z$  наиболее чувствительно к жесткости траверсы и стойки. Наименее влияющая деталь – станина. Варьирование жесткостью траверсы вдвое дает разные отклики на уменьшении (44,2 %) и на увеличении (28,3 %) жесткости. Следовательно, базовый уровень жесткости траверсы лежит на переходном участке гиперболы жесткости ( $E = 110$  МПа соответствует базовому варианту, и на его уровне все кривые пересекаются). Поэтому траверса и стойка существенно откликаются на изменение  $E$ . Уменьшение их жесткости нежелательно, а увеличение положительно и дает снижение податливости всей системы.

Кривые, соответствующие саням и станине, исходно находятся на границе переходного и индифферентного участков. Уменьшать их жесткость не следует (вход в переходной участок), но и увеличение не актуально (движение по индифферентному участку).

По результатам варьирования была выполнена оценка податливости деталей портала  $k_i$  по формулам (3)–(5). Обратная величина для каждой детали будет называться эффективной жесткостью  $r_i^e$ . Доли податливости деталей в общей податливости портала  $k_i/K$  представлены на диаграмме (рис. 6, б). Подтверждается, что в усилении нуждаются прежде всего траверса и стойка станка. Вместе на них приходится  $k_{тр} + k_c = 68$  % податливости. На третьем месте среди отливок – сани ( $k_{сан} = 9$  %). Башмаки, опоры качения и станина в сумме дают 8 % влияния на податливость. В долю «остальное» ( $k_{ост} = 15$  %) входят податливости монолитных суппорта и ползуна, а также направляющих каретки, рельс и фундаментных блоков.

Отсюда можно заключить, что существенна податливость тех деталей портала, которые контролируют поворот оси шпинделя  $\alpha_{XZ}$ . Поэтому понижать податливость портала надо за счет следующих решений:

- увеличения крутильной жесткости траверсы;
- усиления передней стенки стойки (слабое место стойки при изгибе в плоскости  $XZ$ );
- увеличения изгибной жесткости саней в плоскости  $XZ$ .

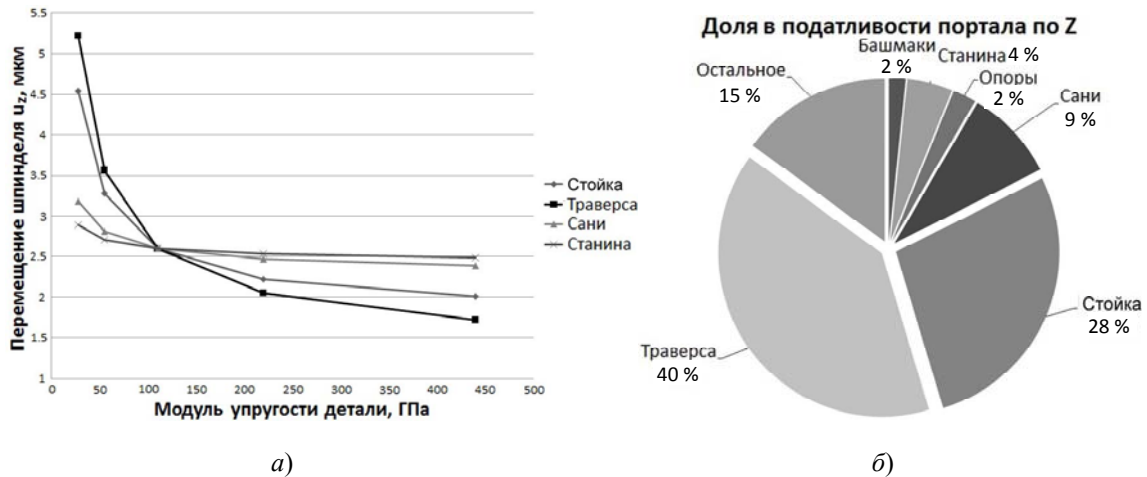


Рис. 6. Влияние варьирования модуля упругости (жесткости) деталей портала на перемещение шпинделя (податливость портала) по оси  $Z$  (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

Все эти задачи решаются при заполнении траверсы, стойки и саней полимербетоном. Создаваемая в отливке вставка увеличивает ее жесткость не менее чем в два раза. Например, для стойки виртуальное удвоение жесткости снизило  $u_z$  с 2,6 до 2,22 мкм. Реалистичная же полимербетонная вставка при базовых свойствах чугуна дает  $u_z = 2,15$  мкм.

Благодаря вставкам податливость портала резко уменьшается. Кручение и изгибы малозаметны. Становится жестким носок станины. Удлинение передней стороны колонны не превышает 0,1 мкм, в то время как в базовом варианте (рис. 6, а) из-за податливости носка было отмечено  $0,56 - 0,27 = 0,29$  мкм.

Наиболее эффективна вставка в траверсе. Размещение вставок во всех трех отливках обеспечивает  $u_z = 1,1$  мкм. Жесткость портала возрастает в 2,3 раза.

#### Моделирование портала при нагружении продольной силой

Деформации портала при нагружении вдоль оси  $X$  показаны на рис. 7, а. Виден существенный локальный изгиб на конце шпинделя. Чтобы не учитывать его величиной  $u_x$  считалось перемещение конца ползуна (1,94 мкм вместо 2,5 мкм).

Продольная жесткость портала  $R_x = F_x / u_x = 1000 / 1,94 = 515$  Н/мкм. Это на 75 % больше, чем в вертикальном направлении. Большое различие жесткости портала в разных направлениях нежелательно. Особой проблемой это может оказаться для динамического качества станка.

Особенностью данного случая нагружения является поворотная деформация. Из-за кручения траверсы шпиндель поворачивается против часовой стрелки. Стойка же, деформируя нижележащие детали, поворачивается по часовой стрелке и частично гасит поворот суппорта. Их разностью является угол поворота шпинделя  $\alpha_{XZ}$ .

Ведущей деформацией при продольном нагружении является кручение траверсы. Поэтому траверса отвечает почти за половину податливости портала (рис. 7, б).

Заполнение полимербетоном только траверсы уже очень эффективно для жесткости станка. Крутильные деформации траверсы падают. Ее угол закручивания уменьшается и может стать равным углу наклона стойки. В результате шпиндель может оказаться практически вертикальным ( $\alpha_{xz} \approx 0$ ).

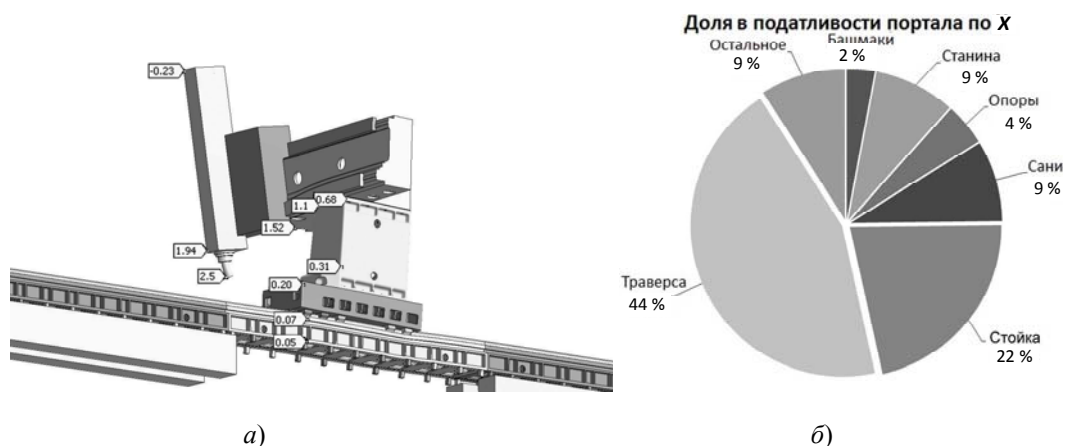


Рис. 7. Картина деформации портала при нагружении силой  $F_x$  (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

Получается, что тонким подбором геометрии и упругих свойств полимербетонных вставок можно обеспечить сохранение вертикальности шпинделя при продольном нагружении.

#### Моделирование портала при нагружении поперечной силой

Результаты нагружения портала в поперечном направлении  $Y$  представлены на рис. 8, а. Жесткость портала  $R_y = F_y / u_y = 1000 / 3,41 = 293$  Н/мкм.

Наибольший вклад в деформацию портала вносит боковой наклон стойки. Он определяет сдвиг всей конструкции. Во-первых, стойку слабо удерживают от наклона сани и станина. Последняя деталь довольно легко поддается кручению, и ее недостаточно связывают башмаки. Во-вторых, оказываются податливыми стенки траверсы возле стыка со стойкой. Они локально деформируются и допускают наклон стойки при горизонтальном движении траверсы.

Варьирование жесткостей деталей портала показывает, что конструкция чувствительна, прежде всего, к состоянию стойки. Траверса отступает на второе место.

В податливости портала (рис. 8, б) также большая доля приходится на станину и башмаки – 22 %. При вертикальном нагружении они в сумме занимали 6 %, при продольном – 12 %. Это – результат крутильной податливости станины.

Поперечное нагружение не связано с существенными изгибом или кручением траверсы. Ее доля в податливости обусловлена слабостью района стыка со стойкой.

Применение полимербетонных вставок резко повышает жесткость конструкции. Взаимный поворот траверсы и колонны блокируется. Район их стыка усиливается и превращается в жесткий узел. Перемещение на шпинделе падает с 3,41 до 1,69 мкм, т. е. в 2,0 раза.

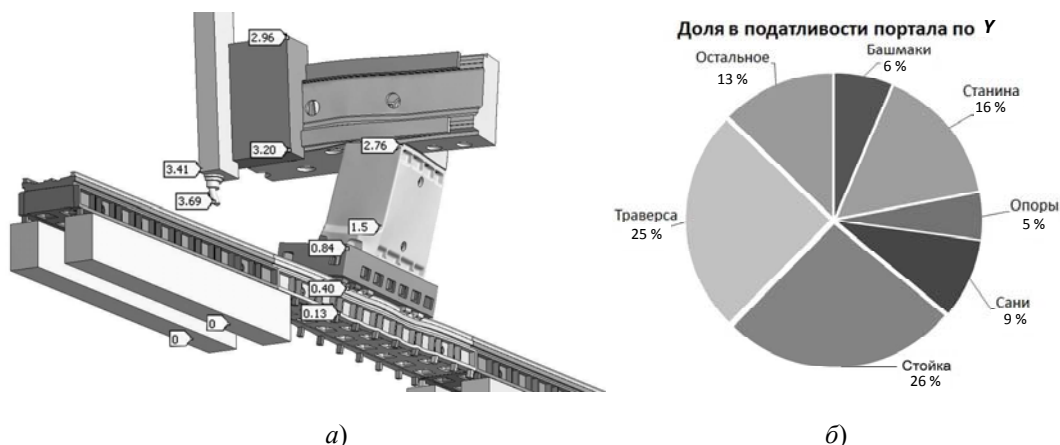


Рис. 8. Картина деформации портала при нагружении силой  $F_Y$  (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

### Моделирование портала при нагружении собственным весом

Сила тяжести суппорта – главная статическая нагрузка на портал. Она ассиметрична и сосредоточена. Поэтому возникает «клевок» портала – опускание и поворот бабки со шпинделем против часовой стрелки. Статические вертикальные перемещения портала под ее действием силы тяжести представлены на рис. 9, а.

Жесткость портала составляет  $R_G = F_{G_{баб}} / u_{zG} = 50000 / 171,3 = 291$  Н/мкм (где  $F_{G_{баб}} = 50000$  Н – сила тяжести бабки, а  $u_{zG}$  – статическое вертикальное перемещение на конце шпинделя). В МКЭ-расчете портал во всех своих частях находится под действием силы тяжести, но деформационные перемещения (табл. 1) отнесены к весу суппорта. Так сделано потому, что вес большей части остальных деталей портала прямо передается на фундамент. Это вызывает сжатие, перемещения от которого обычно малы по величине. Податливость портала обуславливают главным образом изгибы и кручения деталей.

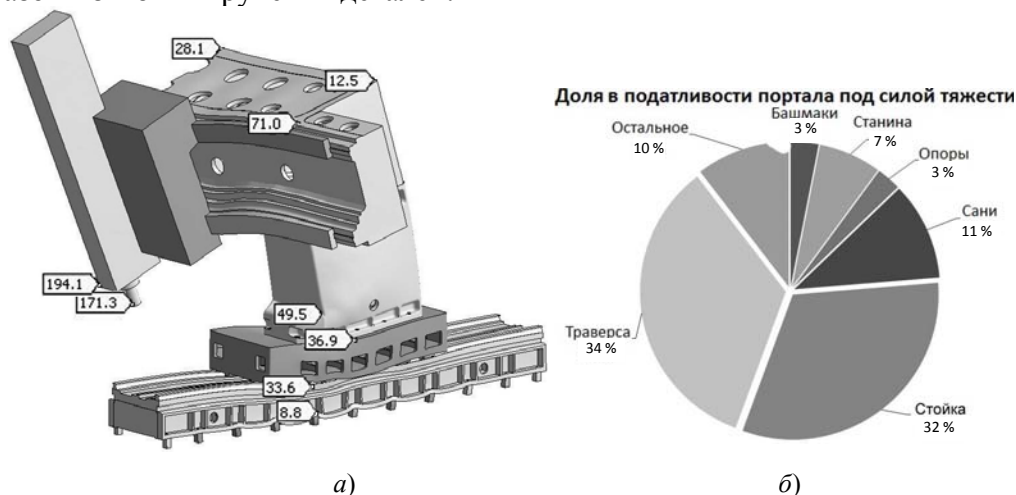


Рис. 9. Картина вертикальных статических перемещений портала при нагружении силой тяжести (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

Клевок бабки обеспечивают три деформационных движения:

- 1) кручение траверсы против часовой стрелки (иллюстрируется маркерами вертикального опускания 71,0 мкм и 12,5 мкм на рис. 9, а);
- 2) изгиб траверсы (опускание середины траверсы на 28,1 мкм, а конца – только на 12,5 мкм; прогиб  $\delta = 28,1 - 12,5 = 15,6$  мкм);



3) локальное складывание стенок в районе носка стойки (маркер 49,5 мкм), ведущее к проседанию всей передней стороны стойки.

Кручение и изгиб обуславливают существенную долю (34 %) траверсы в податливости портала (рис. 9, б). Благодаря складыванию стенок (податливость носка) доля стойки почти столь же велика (32 %).

Доля саней (11 %) связана с их прогибом под стойкой. Однако вряд ли это имеет прямое отношение к величине клевка бабки.

Анализ податливости деталей портала для всех 4-х случаев нагружения показывает, что всегда с большим отрывом лидируют траверса и стойка. Именно их нужно усиливать в первую очередь. Третьей по важности деталью являются сани.

Таблица 1

Влияние жесткости деталей портала на вертикальное перемещение  $u_{ZG}$  и поворот  $\alpha_{XZ}$  шпинделя при действии силы тяжести

Деталь	Коэффициент вариации $a_{вж}$	Модуль упругости $E$ , ГПа/жесткость $r_i$ , Н/мкм	Перемещение шпинделя $u_{ZG}$ , мкм	Угол поворота ползуна $\alpha_{XZ}$ , рад $10^{-6}$	Изменение $u_{ZG}$ по сравнению с базой, %	Изменение $\alpha_{XZ}$ по сравнению с базой, %
Базовый вариант	1	110 / 3000	171,3	81,162	–	–
Башмак	1/2	– / 1500	177,9	83,817	3,9 %	3,3 %
	2	– / 6000	169,3	79,170	–1,2 %	–2,5 %
Станина	1/2	55 / –	184,6	83,320	7,8 %	2,7 %
	2	220 / –	166,0	79,502	–3,1 %	–2,0 %
Опора	1/2	– / 1500	177,8	80,830	3,8 %	–0,4 %
	2	– / 6000	169,9	79,834	–0,8 %	–1,6 %
Сани	1/2	55 / –	190,7	88,797	11,3 %	9,4 %
	2	220 / –	162,3	76,846	–5,3 %	–5,3 %
Колонна	1/2	55 / –	225,0	108,216	31,3 %	33,3 %
	2	220 / –	143,5	67,552	–16,2 %	–16,8 %
Траверса	1/2	55 / –	227,2	115,021	32,6 %	41,7 %
	2	220 / –	141,0	63,402	–17,7 %	–21,9 %
Вставка (п/б) в сани		110+30(п/б) / –	156,8	73,859	–8,5 %	–9,0 %
Вставка (п/б) в стойку		110+30(п/б) / –	142,3	64,398	–16,9 %	–20,7 %
Вставки (п/б) в стойку и сани		110+30(п/б) / –	127,5	55,436	–25,6 %	–31,7 %
Вставка(п/б) в траверсу		110+30(п/б) / –	152,9	48,133	–10,7 %	–40,7 %
Вставки (п/б) в траверсу и колонну		110+30(п/б) / –	112,9	29,876	–34,1 %	–63,2 %
Вставки (п/б) в траверсу, колонну и сани		110+30(п/б) / –	94,9	23,568	–44,6 %	–71,0 %

Обратим также внимание на нижнюю полку станины (маркер 8,8 мкм). Она локально изгибается в районе каждого башмака. Полку следует усилить, но это даст

лишь меньшее на несколько микрометров равномерное проседание станины. Картина клевка не изменится. По сравнению с величиной клевка (171 мкм) эффект усиления станины будет невелик.

Резко снизить статическую деформацию портала способны полимербетонные вставки. Может показаться, что вставка утяжелит траверсу и увеличит ее прогиб. Однако МКЭ-расчет показывает, что прогиб практически неизменен и составляет  $\delta = 53,3 - 37,8 = 15,5$  мкм.

Следовательно, возросшая изгибная жесткость траверсы компенсирует ее утяжеление. Кроме того, возрастает крутильная жесткость. Одиночная вставка в траверсу снижает статическое опускание шпинделя (табл. 1) до 152,9 мкм (в 1,12 раз).

Одиночная вставка в стойку уменьшает перемещение шпинделя до 142,3 мкм (в 1,2 раза). Носок стойки заполняется полимербетоном и становится жестким.

Заливка полимербетона и в стойку, и в траверсу снижает  $u_{zG}$  до 112,9 мкм (в 1,52 раза). Существенно, что  $1,52 > 1,12 \cdot 1,2 = 1,34$ . Это эффект **синергизма** между стойкой и траверсой. Он еще будет обсужден ниже.

Вставки в траверсу, колонну и сани не позволяют шпинделю опуститься более чем на 94,9 мкм. Следовательно, эффект клевка уменьшается в 1,81 раза. Это можно считать достаточным.

### Влияние полимербетонных вставок на жесткость портала

В зависимости от состава полимербетона его модуль упругости  $E_{пб}$  может изменяться в пределах 10–40 ГПа [4]. Влияние полимербетонных вставок на жесткость портала было оценено при нагружении станка собственным весом. Результат представлен в табл. 2.

Таблица 2

Влияние модуля упругости  $E_{пб}$  полимербетонных вставок на вертикальное перемещение  $u_z$  и поворот шпинделя  $\alpha_{xz}$  под действием силы тяжести

Модуль упругости полимербетона $E_{пб}$ , ГПа	Перемещение конца шпинделя $u_z$ , мкм	Угол поворота ползуна $\alpha_{xz}$ , рад $10^{-6}$	Изменение $u_z$ по сравнению с базой, %	Изменение $\alpha_{xz}$ по сравнению с базой, %	Жесткость портала $R$ , Н/мкм
0 (база)	171,3	81,162	–	–	291,9
5	149,5	45,477	–17,0 %	–44,0 %	334,4
10	127,2	36,349	–29,5 %	–55,2 %	393,1
20	106,2	28,050	–41,4 %	–65,4 %	470,8
30	94,9	23,568	–47,9 %	–71,0 %	526,9
50	82,3	18,755	–55,1 %	–76,9 %	607,5

Зависимость  $u_z = f(E_{пб})$  оказалась плавной. Следовательно, умеренные колебания упругих свойств полимербетона не являются критичными. При  $E_{пб} > 30$  ГПа наращивание модуля упругости во вставках дает небольшой эффект в жесткости портала. Уменьшение  $E_{пб}$  ниже 10 ГПа делает вставки малозаметными в несущей системе станка. Поэтому для практики рекомендуется обеспечить  $E_{пб} = 20–30$  ГПа.

Влияние полимербетонных вставок на жесткость портала подытожено в табл. 3. Заполнение полимербетоном только саней дает рост жесткости в 1,08 раза (в среднем по всем случаям нагружения). Вставка в стойку обеспечивает результат в 20 %. Заполнение траверсы наиболее эффективно – жесткость портала увеличивается в 1,48 раза.

Таблица 3

**Жесткость портала  $R$  для разных случаев нагружения в зависимости от применения полимербетонных вставок**

Деталь	Сила, действующая на портал, Н				Средняя жесткость $R$ , Н/мкм	Увеличение жесткости относительно базовой (раз)
	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$G$		
База	384,6	515,2	293,3	291,9	371,2	1
Сани–вставка	419,5	554,0	316,5	318,9	402,2	1,08
Стойка–вставка	463,4	612,7	352,1	351,4	444,9	1,20
Траверса–вставка	581,1	877,2	411,5	327,0	549,2	1,48
Три вставки	895,3	1245,3	590,0	526,9	814,4	2,19

Можно было бы предположить, что вставки сразу во все три перечисленные детали повысят жесткость в  $1,08 \cdot 1,2 \cdot 1,48 = 1,92$  раза. В действительности жесткость поднимается в 2,2 раза. Это эффект **синергизма**, т. е. увеличение жесткости системы (портала) в результате взаимодействия между деталями-соседями. Усиление полимербетонной вставкой только одной детали отчасти гасится локальными деформациями в смежных податливых деталях. Возле стыков деформируются их тонкие, неподкрепленные стенки. Поэтому любой неподвижный стык деталей желательно подкрепить полимербетоном с обеих сторон.

Мнение о синергизме при одновременном заполнении полимербетоном всех деталей портала подтверждает табл. 3. Из нее следует, что эффекты от отдельных вставок невелики. Резкий скачок для всех случаев нагружения происходит при создании трех соседствующих вставок.

Следовательно, целесообразно заполнять полимербетоном сразу весь портал. Например, если залита траверса и на это потрачено 6396 кг материала, то заполнение стойки и саней потребует только 2851 кг. Жесткость же портала поднимется с 549 до 814 Н/мкм, а демпфирование колебаний полимербетоном будет обеспечено практически по всему станку. Затраты на вставки можно будет уменьшить оптимизацией их формы, например, не заполняя сердцевины траверсы и стойки.

Как видно из табл. 3, полимербетонные вставки не выравнивают жесткость портала по осям. Однако они обеспечивают очень хорошее демпфирование. Сочетание высокой статической жесткости (пусть и неравномерной) и сильного демпфирования должно положительно сказаться на динамическом качестве станка.

Сделанные оценки предполагают полное сцепление детали и ее вставки. Пробный МКЭ-расчет показал, что отслоившаяся вставка, контактирующая с отливкой через поверхности трения, дает весьма небольшой эффект по жесткости. Следовательно, сцепление детали и вставки должно быть технологически обеспечено и контролировано.

### **Заключение**

1. Методами математического моделирования установлено, что основными деталями, обуславливающими на 2/3 податливость подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри», являются траверса и стойка. В меньшей степени податливость зависит от саней (9 %). Распределение податливостей между деталями примерно одинаково для случаев нагружения портала тремя компонентами силы резания и силой тяжести.

2. Наименьшая жесткость на шпинделе отмечена в поперечном направлении ( $R_y = 293$  Н/мкм), наибольшая – в продольном направлении ( $R_x = 515$  Н/мкм). Жесткость в целом невелика, а ее изменение по направлению (до 75 %) существенно, что нежелательно для статического и динамического качества станка.

3. Траверса станка нуждается в увеличении крутильной жесткости. Стойке и саням необходим подъем изгибной жесткости в вертикальной продольной плоскости XZ.

4. Станина, опоры качения и фундаментные башмаки обладают достаточной жесткостью. Ее дальнейшее увеличение слабо сказывается на жесткости портала. При этом недопустимо уменьшение жесткости каждой отдельной опоры качения или башмака ниже 400 Н/мкм.

5. Снижение податливости портала достигается заполнением внутренних полостей деталей несущей системы станка полимербетоном. У любой базовой детали это поднимает жесткость не менее чем в 2 раза. Для полимербетона желателен модуль упругости не ниже 20–30 ГПа. Отслоение вставки от поверхности детали снижает эффект от ее применения практически до нуля.

6. Вставки из полимербетона эффективно снижают крутильную податливость траверсы и изгибную податливость стойки и саней. Вставки уменьшают статический прогиб станка от силы тяжести до 1,8 раз, несмотря даже на производимое ими утяжеление конструкции.

7. Важно использование вставок из полимербетона одновременно в трех основных деталях портала – в траверсе, стойке и санях. Эффект от заполнения полимербетоном только одной из них гораздо меньше: 48 % для траверсы, 20 % для колонны и 8 % для саней. Благодаря синергизму, являющемуся результатом взаимодействия между соседними базовыми деталями, жесткость портала во всех направлениях повышается в среднем до 2,2 раз.

### Литература

1. Шпур, Г. Справочник по технологии резания металлов : пер. с нем. В 2 кн. / Г. Шпур, Т. Штеферле. – М. : Машиностроение, 1985. – Кн. 1. – 616 с.
2. Кирайт, Ю. Н. Продукция УП «МЗОР» / Ю. Н. Кирайт // Машиностроение–2010: технологии – оборудование – инструмент – качество : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 апр. 2010 г. – Минск : Бизнесофсет, 2010. – С. 91–92.
3. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация : пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 312 с.
4. Браиловский, М. И. Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М. И. Браиловский, А. Г. Воскобойник, А. А. Воскобойник. – Коломна : Воентехиздат, 2010. – 76 с.
5. Козловский, Н. А. Жесткость и виброустойчивость тяжелых фрезерных станков / Н. А. Козловский, М. П. Зайкин. – Минск : Наука и техника, 1986. – 135 с.
6. Туромша, В. И. Исследование жесткости продольно-фрезерного станка с подвижным порталом с помощью конечно-элементного моделирования / С. С. Довнар, Туми эль-Мабрук Абужафер Али // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2010. – Вып. 25. – С. 270–277.

Получено 27.07.2011

УДК 538.3

## МЕТОД РАСЧЕТА КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕНЗОРА ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ У ГРАНИЦ НЕКОГЕРЕНТНОГО ДВОЙНИКА

**Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ, О. М. ОСТРИКОВ**

*Учреждение образования «Белорусский национальный  
технический университет», г. Минск*

### Введение

Необходимость развития теории заклинившихся двойников связана с тем, что на практике часто приходится иметь дело с двойникующимися материалами, которые предварительно обработаны давлением. В таких твердых телах уже сформирована система двойников, которые выступают в качестве концентраторов напряжений, оказывающих существенное влияние на физические свойства материала [1]. Целенаправленно изменять свойства двойникующихся материалов и разрабатывать основы технологии их обработки удобно при использовании теоретических расчетов, основанных на представлениях о дислокационной природе процесса двойникового, рассмотренной, например, А. М. Косевичем и В. С. Бойко в работе [2]. Поэтому хорошо зарекомендовавший себя в теории двойникового дислокационный подход требует дальнейшего развития.

Целью данной работы стала разработка метода расчета пластической деформации у границ клиновидного некогерентного двойника.

### Постановка задачи

Клиновидные некогерентные микродвойники, как правило, возникают в монокристаллах в областях локализации внешних напряжений, например, при деформировании поверхности двойникующегося кристалла алмазной пирамидкой Виккерса, Берковича или Кнупа [1], [3]–[5]. Следует отметить, что интерес к данному явлению в настоящее время возрос из-за все более широкого применения на практике материалов с памятью формы, у которых проявляется родственное двойникованию бездиффузионное фазовое превращение.

Пусть распределение дислокаций у границы двойника задается тензором плотности дислокаций  $\alpha_{ij}$ . Тогда в случае ненагруженного твердого тела с клиновидным двойником, следуя подходам работы [6], условие равновесия может быть записано в виде:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad \tilde{S}_{ij} - S_{ij}^r = 0, \quad \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij} < \frac{2}{3} Y_s^2,$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + S_{ij}, \quad p = -K\varepsilon_{kk}^e, \quad S_{ij} = 2\mu e_{ij}^e, \quad K = \lambda + \frac{2\mu}{3},$$

$$e_{ij}^e = \varepsilon_{ij}^e - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij}, \quad \varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \varepsilon_{ij}^p, \quad \varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{2} (\beta_{ij} + \beta_{ji}),$$

$$\tilde{S}_{ij} = S_{ij} + S'_{ij}, \quad S'_{ij} = \sigma'_{ij} - \frac{1}{3} \sigma'_{kk} \delta_{ij}, \quad \sigma'_{ij} = -C \varepsilon_{jkl} \frac{\partial \alpha_{li}}{\partial x_k}, \quad \alpha_{ji} = \varepsilon_{jsp} \frac{\partial \beta_{pi}}{\partial x_s}, \quad (1)$$

где  $u_i$  – компоненты вектора перемещений;  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений;  $\varepsilon_{ij}$  – тензор деформаций;  $\beta_{ij}$  – тензор пластической дисторсии;  $S_{ij}$  – тензор девиатора напряжений;  $\tilde{S}_{ij}$  – девиатор полных напряжений;  $S'_{ij}$  – напряжения сил трения покоя;  $Y_s$  – предел текучести материала;  $e_{ij}$  – тензор девиатора деформаций;  $\alpha_{ji}$  – тензор плотности дислокаций;  $\varepsilon_{ijk}$  – абсолютно антисимметричный тензор Леви-Чивиты;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $p$  – давление;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $\mu$  – модуль сдвига; индекс  $e$  обозначает упругие деформации; индекс  $p$  обозначает пластические деформации;  $\sigma'_{ij}$  – вихревые самоуравновешенные напряжения, определяемые по формуле [6]:

$$\sigma'_{ij} = -C \varepsilon_{jkl} \frac{\partial \alpha_{li}}{\partial x_k} = -C \varepsilon_{jkl} \varepsilon_{lsp} \frac{\partial^2 \beta_{pi}}{\partial x_k \partial x_s}, \quad (2)$$

где  $C$  – константа.

Граничные условия для рассматриваемой задачи ненагруженного упругого полупространства имеют вид:

$$f_i = \sigma_{ij} n_j, \quad \varepsilon_{kjl} n_j \alpha_{li} = 0, \quad (3)$$

где  $f_i$  – поверхностная сила;  $n_j$  – компоненты вектора нормали к поверхности.

Условия (1) правомерны для использования в задаче о клиновидном микродвойнике, рассматриваемом в деформируемом твердом теле, как упорядоченное скопление дислокаций, так как с позиций континуальной теории дислокаций единичная дислокация представляется незаконченным сдвигом в сплошной среде [7]. Если для единичной дислокации справедливы подходы механики сплошных сред, то такие же подходы применимы и для групп дислокаций.

В (1) соотношения, связывающие тензора пластической деформации, пластической дисторсии и внутренних напряжений получены исходя из равенства нулю поверхностных интегралов в условии экстремальности  $\delta S = 0$ , где  $S$  – действие, определяемого как  $S = \int L dt$  [8]. Здесь  $L$  – лагранжиан, который состоит из двух частей [9]:

$$L = L_e(D_4 u_i, D_j u_i) + L_d(J_{ij}, \alpha_{ij}), \quad (4)$$

где

$$J_{ij} = - \left( \frac{\partial \beta_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial \beta_{4j}}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

поток дислокаций.

Лагранжиан  $L$  инвариантен при преобразованиях [9]:

$$u'_i = u_i + h_i(x_j, t). \quad (6)$$

При  $\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \ll 1$   $L_e(D_4 u_i, D_j u_i)$  находится из лагранжиана [8]:

$$L_e = \int dV \left[ \frac{1}{2} \rho \dot{u}_i \dot{u}_i - \frac{\lambda}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{\mu}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (7)$$

где  $\dot{u}_i = \frac{\partial u_i}{\partial t}$ ,  $\rho$  – плотность;  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе. При этом используется замена [9]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} \rightarrow D_4 u_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + \beta_{4i}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \rightarrow D_j u_i = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta_{ji}. \quad (8)$$

Здесь  $\beta_{4i}(x_k, t), \beta_{ji}(x_k, t)$  – калибровочные поля, связанные с лагранжианом [9]:

$$L_d = \frac{1}{2} \int (B J_{ji} J_{ji} - C \alpha_{ij} \alpha_{ij}) dV, \quad (9)$$

где  $B$  – новая константа.

Тензора  $J_{ji}$  и  $\alpha_{ij}$ , входящие в (9), удовлетворяют соотношениям:

$$\int_S \alpha_{ij} n_i dS = \int_S \varepsilon_{ikl} \frac{\partial \beta_{lj}}{\partial x_k} n_i dS = \oint \beta_{lj} dx_l = B_j; \quad (10)$$

$$- \int_{\partial S} J_{ij} dx_i = \oint \frac{\partial \beta_{ij}}{\partial t} dx_i = \frac{\partial B_j}{\partial t}, \quad (11)$$

где  $B_j$  – сумма векторов Бюргера всех дислокаций;  $\partial S$  – контур, ограничивающий площадку  $S$ , которую пересекают линии дислокаций.

Подставляя лагранжиан (4) в уравнение Эйлера–Лагранжа [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial L}{\partial q_{i,j}} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = 0, \quad (12)$$

где переменные  $q_i = \{u_i, \beta_{4i}, \beta_{ij}\}$  определяются из уравнения  $\delta S = 0$ , получим [9]:

$$B \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \beta_{ji}}{\partial t} + \frac{\partial \beta_{4i}}{\partial x_j} \right) = \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + \beta_{4i} \right); \quad (13)$$

$$B \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \beta_{ji}}{\partial t} + \frac{\partial \beta_{4i}}{\partial x_j} \right) = -C \varepsilon_{jkl} \frac{\partial \alpha_{ji}}{\partial x_k} + \sigma_{ij}; \quad (14)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + \beta_{4i} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}. \quad (15)$$

Для  $\sigma_{ij}$ , входящих в (13)–(15), справедливы формулы (1).

Тензор плотности дислокаций может быть определен по формуле [10]:

$$\alpha_{ij} = \sum_q \tau_i^q b_j^q f^q, \quad (16)$$

где  $\tau^q$  – единичный вектор, направленный по касательной к дислокационной линии;  $b^q$  – вектор Бюргерса;  $f^q$  – функция распределения дислокаций;  $q$  обозначает сорт дислокаций, и суммирование ведется по всем их типам.

Формула (16) позволяет перейти к определяемой экспериментально плотности дислокаций [10]:

$$\rho_d = \sum_{ijl} (\tau_i^q b_j^q)^{-1} \alpha_{ij}. \quad (17)$$

Сопоставляя (16) и (17), получим, что

$$\rho_d = \sum_q f^q. \quad (18)$$

Частным случаем задачи (1) является плоскодеформированное состояние, для которого (1) примет вид [11]:

$$\begin{aligned} \alpha_{zx} &= \frac{\partial \beta_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial \beta_{xx}}{\partial y}, \quad \alpha_{zy} = \frac{\partial \beta_{yy}}{\partial x} - \frac{\partial \beta_{xy}}{\partial y}, \\ \beta_{xx} + \beta_{yy} &= 0, \quad \varepsilon_{xy}^p = \frac{1}{2}(\beta_{xy} + \beta_{yx}), \quad \varepsilon_{xx}^p = \beta_{xx}, \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} &= 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0, \\ \sigma_{xx} &= -p + S_{xx}, \quad \sigma_{yy} = -p + S_{yy}, \quad \sigma_{xy} = S_{xy}, \\ p &= K \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right), \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}, \\ S_{ij} &= 2\mu e_{ij}^e, \quad e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p, \quad e_{ij}^p = \varepsilon_{ij}^p, \\ e_{xx} &= \varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}), \quad e_{yy} = \varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}), \quad e_{xy} = \varepsilon_{xy}, \\ \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right), \\ \tilde{\sigma}_{xx} &= \sigma_{xx} + \sigma'_{xx}, \quad \tilde{\sigma}_{yy} = \sigma_{yy} + \sigma'_{yy}, \quad \tilde{\sigma}_{xy} = \sigma_{xy} + \sigma'_{xy}, \quad \tilde{\sigma}_{yx} = \sigma_{yx} + \sigma'_{yx}, \\ \sigma'_{xx} &= -C \frac{\partial \alpha_{zx}}{\partial y}, \quad \sigma'_{yy} = C \frac{\partial \alpha_{zy}}{\partial x}, \quad \sigma'_{xy} = C \frac{\partial \alpha_{zx}}{\partial x}, \quad \sigma'_{yx} = -C \frac{\partial \alpha_{zy}}{\partial y}. \end{aligned} \quad (19)$$

Граничные условия (3) в этом случае примут вид:

$$\sigma_{xx} n_x + \sigma_{xy} n_y = 0, \quad \sigma_{yy} n_y + \sigma_{yx} n_x = 0, \quad \alpha_{zx} = \alpha_{zy} = 0. \quad (20)$$



Как было показано в [11], систему уравнений для нахождения  $\beta_{ij}$ ,  $e_{ij}^p$  можно представить в следующем виде

$$\frac{\partial \beta_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \beta_{xx}}{\partial y} = \alpha_{zx}, \quad \frac{\partial \beta_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \beta_{xy}}{\partial y} = -\alpha_{zy}, \quad e_{ij}^p = \beta_{ij}. \quad (21)$$

Отсюда после дифференцирования левой и правой части двух первых уравнений в (21), с учетом того, что  $\beta_{xx} = -\beta_{yy}$ , получим:

$$\frac{\partial^2 \beta_{xx}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \beta_{xx}}{\partial y^2} = -\left( \frac{\partial \alpha_{zy}}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_{zx}}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial^2 \beta_{xy}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \beta_{xy}}{\partial y^2} = \frac{\partial \alpha_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_{zy}}{\partial y}. \quad (22)$$

Заметим, что уравнения равновесия из (19) могут быть представлены в виде уравнений Навье [11]:

$$\begin{aligned} \Delta u_x + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \vec{u} &= 2 \left( \frac{\partial \beta_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \beta_{xy}}{\partial y} \right), \\ \Delta u_y + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial y} \operatorname{div} \vec{u} &= 2 \left( \frac{\partial \beta_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \beta_{xx}}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \\ \operatorname{div} \vec{u} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y}. \end{aligned}$$

**Метод расчета тензора пластической деформации, локализованной у границ некогерентного двойника.** Пусть дислокации непрерывно распределены на двойниковых границах, форма которых описывается функциями  $f_1(x_0)$  и  $f_2(x_0)$ . Пусть дислокации на данных границах параллельны друг другу. Являясь концентраторами больших внутренних напряжений, некогерентные двойниковые границы пластифицируют прилегающие к ним области, генерируя дополнительные дислокации, наличие которых также будем учитывать. Поставленную задачу можно решать двумя способами: 1) задав тензор  $\alpha_{ij}$  и, решив уравнения Пуассона (22), найти  $\beta_{ij}$ ; 2) задав  $\beta_{ij}$  и используя уравнения (21), найти  $\alpha_{ij}$ .

Необходимость задания  $\alpha_{ij}$  или  $\beta_{ij}$  обусловлена тем, что для нахождения четырех компонент  $\alpha_{zx}$ ,  $\alpha_{zy}$ ,  $\beta_{xx}$  и  $\beta_{xy}$  тензоров плотности дислокаций и пластической дисторсии имеется только два уравнения: (21) или (22). Проще решается задача вторым из отмеченных выше способов. Учитывая локализацию пластической деформации на двойниковых границах, в этом случае для компонент тензора пластической дисторсии и тензора пластической деформации можно записать:

$$\beta_{xx}(x, y) = \varepsilon_{xx}^p(x, y) = \frac{A_1}{\pi N^2 a^2} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N^2 a^2}} dx_0 + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N^2a^2}} dx_0 \Big], \\
\beta_{xy}(x, y) = \varepsilon_{xy}^p(x, y) = & \frac{A_2}{\pi N^2 a^2} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N^2a^2}} dx_0 + \right. \\
& \left. + \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N^2a^2}} dx_0 \right], \quad (24)
\end{aligned}$$

где  $b$  – модуль вектора Бюргера;  $A_1$  и  $A_2$  – константы;  $a$  – межатомное расстояние;  $N$  – число плоскостей, между которыми распределены двойникоующие дислокации;  $x_0$  – параметр интегрирования.

Локализация пластической деформации на двойниковых границах обусловлена, во-первых, самими двойникоующими дислокациями, являющимися носителями пластической деформации, а во-вторых, согласно экспериментальным данным [1]–[5], некогерентные двойниковые границы, являясь концентраторами больших внутренних напряжений, вносят в прилегающих к ним областях необратимые изменения, связанные с генерацией полных, либо частичных, дислокаций, которые также являются носителями пластической деформации. Таким образом, выбор функций (24) удовлетворительно описывает локализацию пластической деформации в области двойниковых границ (рис. 1). При этом под модулем вектора Бюргера в (16), (17) подразумевается усредненное значение модулей этих векторов у двойникоующих и сгенерированных полных дислокаций, находящихся у двойниковых границ. При получении результата, представленного на рис. 1, принималось:  $L = 50$  мкм,  $H = 10$  мкм,  $A_1 = 10^3 \text{ м}^{-1}$ ,  $N = 4$ ,  $a = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ; форма границ двойника принималась прямолинейной и описывалась функциями:

$$\begin{aligned}
f_1(x_0) &= \frac{H}{2} \left( 1 - \frac{x_0}{L} \right), \\
f_2(x_0) &= -\frac{H}{2} \left( 1 - \frac{x_0}{L} \right). \quad (25)
\end{aligned}$$

Подстановка (23) в (21) дает

$$\begin{aligned}
\alpha_{zx}(x, y) = & \frac{A_1}{\pi N^4 a^4} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} (y - f_1(x_0)) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N^2a^2}} dx_0 + \right. \\
& \left. + \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} (y - f_2(x_0)) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N^2a^2}} dx_0 \right] - \\
& - \frac{A_2}{\pi N^4 a^4} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} (x - x_0) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N^2a^2}} dx_0 + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} (x - x_0) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N^2 a^2}} dx_0 \Bigg], \\
 \alpha_{zy}(x, y) = & \frac{A_1}{\pi N^4 a^4} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} (x - x_0) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N^2 a^2}} dx_0 + \right. \\
 & \left. + \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} (x - x_0) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N^2 a^2}} dx_0 \right] + \\
 & + \frac{A_2}{\pi N^4 a^4} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} (y - f_1(x_0)) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N^2 a^2}} dx_0 + \right. \\
 & \left. + \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} (y - f_2(x_0)) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N^2 a^2}} dx_0 \right]. \tag{26}
 \end{aligned}$$

Подставляя (26) в (17), не трудно найти функцию плотности дислокаций, описывающую локализацию напряжений на двойниковых границах.

Как показали результаты расчетов, компоненты тензора плотности дислокаций и плотность дислокаций имеют наибольшие значения у двойниковых границ.

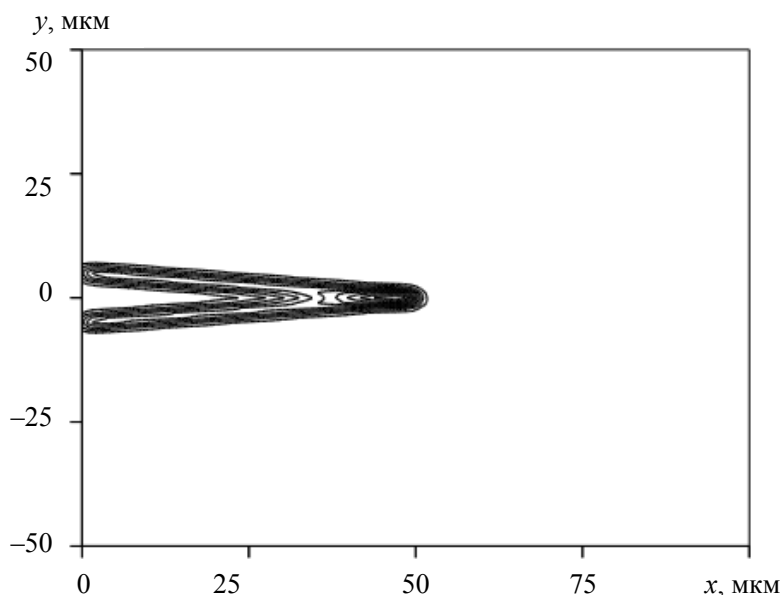


Рис. 1. Изолинии распределения у двойниковых границ значений компоненты  $\varepsilon_{xx}^p(x, y)$  тензора пластической деформации

### Заклучение

Таким образом, решена задача о деформируемом твердом теле с дислокациями для случая двойникового. Показано, что пластическая деформация при двойниковании локализуется на двойниковых границах. Определены компоненты тензора плотности дислокаций при двойниковании.

**Литература**

1. Остриков, О. М. Механика двойникования твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
2. Косевич, А. М. Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов / А. М. Косевич, В. С. Бойко // Успехи физ. наук. – 1971. – Т. 104, № 2. – С. 101–255.
3. Остриков, О. М. Кинетика образования клиновидных двойников в кристаллах висмута, облученных нерастворимыми в матрице мишени ионами / О. М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 1999. – Т. 87, № 5. – С. 78–82.
4. Остриков, О. М. Влияние импульсов электрического тока на работу источников двойникоующих дислокаций в монокристаллах висмута / О. М. Остриков // Инженер.-физ. журн. – 1999. – Т. 72, № 3. – С. 592–594.
5. Остриков, О. М. Влияние облучения ионами бора на характер реализации двойникования и скольжения при длительных (более 60 с) выдержках под нагрузкой кристаллов висмута / О. М. Остриков // Инженер.-физ. журн. – 1999. – Т. 72, № 5. – С. 967–970.
6. Киселев, С. П. Внутренние напряжения в твердом теле с дислокациями / С. П. Киселев // Прикладная механика и техн. физика. – 2004. – Т. 45, № 4. – С. 131–136.
7. Хирт, Дж. Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 600 с.
8. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1987. – 246 с.
9. Киселев, С. П. Модель упругопластического деформирования материалов на основе калибровочной теории дефектов с учетом диссипации энергии / С. П. Киселев // Прикладная механика и техн. физика. – 2004. – Т. 45, № 2. – С. 177–187.
10. Ханнанов, Ш. Х. Модель идеальной релаксации термоупругих напряжений при выращивании монокристаллов / Ш. Х. Ханнанов, С. П. Никаноров, С. И. Бахолдин // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45, № 6. – С. 1020–1023.
11. Белай, О. В. Расчет полей внутренних напряжений для плоскодеформированного состояния упругого тела с дислокациями / О. В. Белай, С. П. Киселев // Прикладная механика и техн. физика. – 2004. – Т. 45, № 6. – С. 116–123.

*Получено 24.02.2011 г.*

УДК 621.9.0116517.962.1

## **АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНОГО СТОЛА МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ШПИНДЕЛЕМ**

**М. И. МИХАЙЛОВ, А. Н. РОМАЧКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Точность станков является одним из основных показателей их качества. Стремительное совершенствование техники, повышение мощности, быстроходности и точности машин, аппаратов, приборов наряду с ростом их надежности требуют опережающего повышения точности металлорежущих станков (МС). Для потребителя точность МС выражается в их способности обеспечить у готового изделия заданные точность размеров, формы и взаимного положения обработанных поверхностей, их волнистость и шероховатость, а также стабильность этих показателей в заданных пределах [1].

Традиционно точность МС обеспечивалась соответствующей точностью изготовления его основных деталей, точностью сборки и регулировки, а также жесткостью элементов, износостойкостью опор и направляющих, стабильностью формы и размеров базовых и корпусных деталей. Кроме того, для повышения точности станков целесообразно использовать специальные устройства и системы для компенсации систематических погрешностей в конкретном экземпляре МС или для управления точностью обработки [1], [2].

Повышение точности станков не только увеличивает их производительность благодаря возможности уменьшения числа рабочих проходов, оптимизации режимов обработки, уменьшения трудоемкости окончательных операций, но и повышает стоимость. Поэтому установление оптимального уровня точности является технико-экономической оптимизационной задачей. Основным источником погрешностей станков с вертикальным шпинделем является отклонение узлов станка под действием сил резания. Одним из основных элементов, влияющих на точность крестового стола, являются направляющие. Часто в конструкциях направляющих используются композиционные материалы на основе полимеров. Требуется оценка влияния применения полимерных материалов на статическую точность крестового стола. В процессе эксплуатации на станок действуют все виды энергии, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов и станка в целом.

### **Методика моделирования**

Для расчетов точности была создана трехмерная твердотельная модель крестового стола (рис. 1). Модель построена по аналогу крестового стола станка 21104П7Ф4.

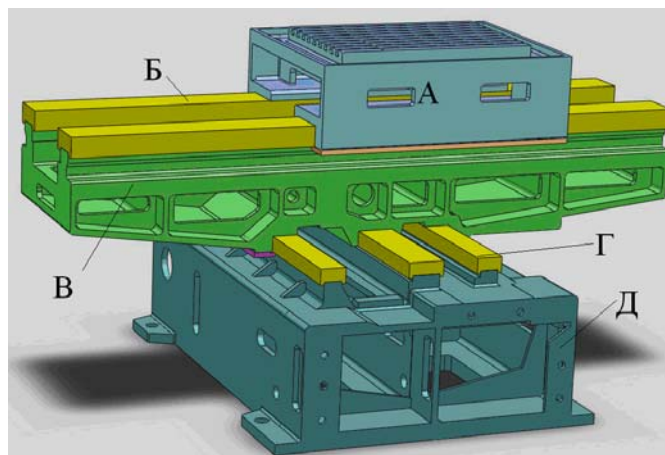


Рис. 1. Трехмерная твердотельная модель крестового стола

Полученная модель условно разделялась на элементы (рис. 2). В подвижных соединениях условия контакта описывались с применением коэффициента трения. Если элементы линейные – деформации в пределах элементов постоянные, а если элементы параболические – деформации изменяются линейно.

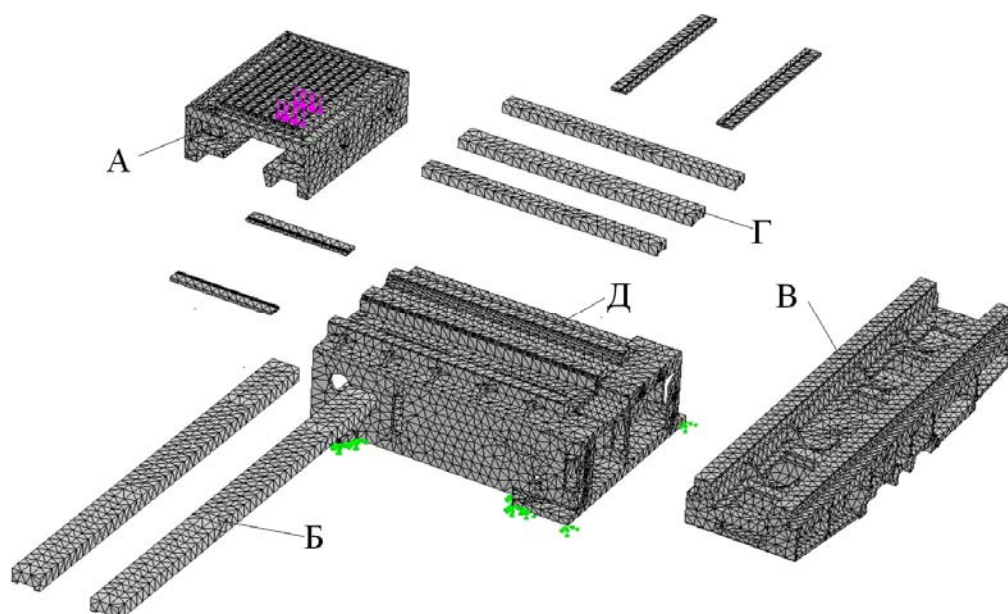


Рис. 2. Сетка модели крестового стола

Для каждого конечного элемента, зная перемещения (углы поворота) в узлах и аппроксимирующие функции, рассчитываются деформации. На основе деформаций вычисляются напряжения в элементах. При необходимости напряжения в узлах смежных элементов усредняются с последующим пересчетом напряжений в пределах каждого элемента.

На основе компонентов напряженно-деформированного состояния и параметров прочности материала (материалов) производилось вычисление эквивалентных напряжений по выбранному критерию прочности.

Анализ полученных исследований производился по графическо-численной шкале. В качестве граничных условий вводились ограничения перемещений основания, имитируя тем самым крепление его к фундаменту. Нагрузку прикладывали к той

части стола, которая обеспечивала наилучший вариант, при этом ее численное значение принимали равным максимальной осевой силе, соответствующей обработке детали на станке. Она принималась по паспорту станка и была равна 10000 Н.

### Исходные данные для моделирования

Детали поперечного суппорта, продольного стола представляют собой литые конструкции из серого чугуна марки СЧ20. В расчетах свойства чугуна принимались следующими: модуль упругости первого рода  $E = 110$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,28$ , плотность  $\rho = 7200$  кг/м<sup>3</sup>. Направляющие выполнялись из легированной стали с модулем упругости  $E = 200$  ГПа, коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,3$  и плотностью  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>. Исходя из того, что контакт осуществляется между сталью и чугуном, коэффициент трения этих материалов принимался равным 0,3. Для исследования сборки с применением полимерных материалов принимался коэффициент трения между сталью и полимерным материалом, равный 0,05.

### Компьютерная модель крестового стола

На рис. 2 представлена трехмерная модель крестового стола. Эта модель содержит: стол А, направляющие поперечного суппорта Б, корпус суппорта В, направляющие основания Г и его корпус Д. МКЭ-моделирование производилось в статической постановке. Модель считалась линейно-упругой. Учитывалась контактная податливость. Сетка была построена по 3D-модели из достаточно точных гексаэдрических и тетраэдрических конечных элементов. Производился расчет напряженно-деформированного состояния модели крестового стола на основе анализа конечных элементов и свойств материалов сборки. Исследование модели крестового стола с условием 100-процентного контакта между плоской поверхностью продольного стола и направляющими. При моделировании с использованием композиционных материалов на направляющих конечными элементами выделялся тонкий слой, толщина которого была равна толщине композиционного слоя. Размеры сетки выбирали переменными, при этом уменьшали размер конечных элементов в зонах стыка, в окружении отверстий, а также там, где происходит изменение кривизны: в местах перехода плоской поверхности в цилиндрическую и торовую (рис. 3). В процессе подбора плотности сетки, отработки граничных условий использовали конечные элементы первого порядка. Это позволяло правильно распределять нагрузку и перемещения в модели, что, в свою очередь, приводило к большей достоверности результатов исследования.

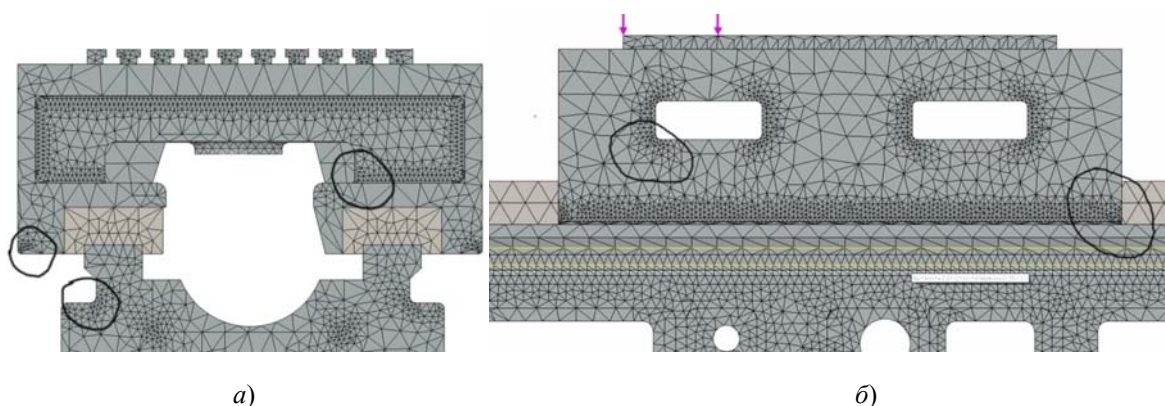


Рис. 3. Сетка модели с применением функции автоматического уплотнения в поперечном (а) и продольном (б) направлениях

Условия контакта в подвижных соединениях устанавливались одинаковыми для всех исследований с учетом особенностей каждого материала. Результаты расчетов представлены на рис. 4 и 5.

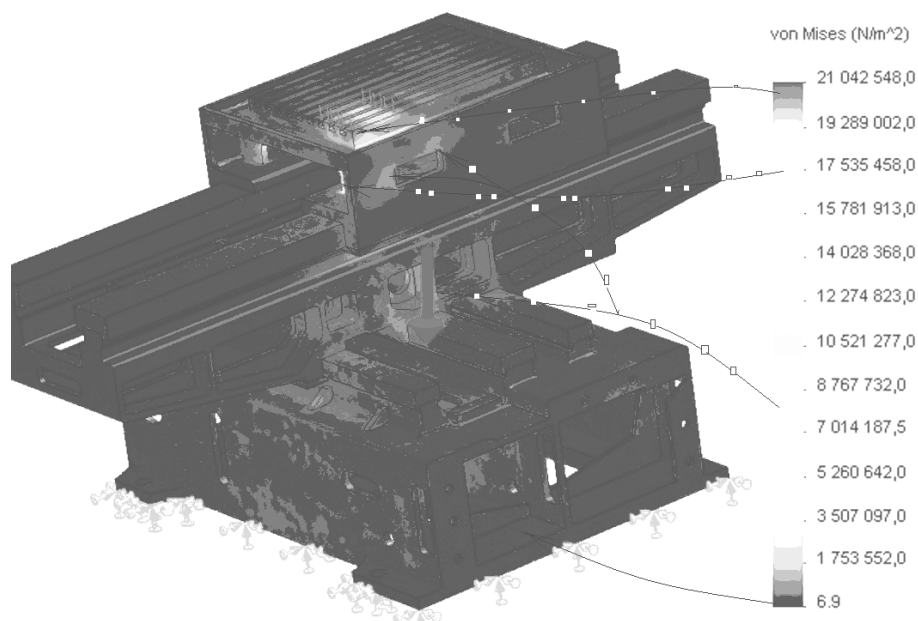


Рис. 4. Картина распределения напряжений в сборке

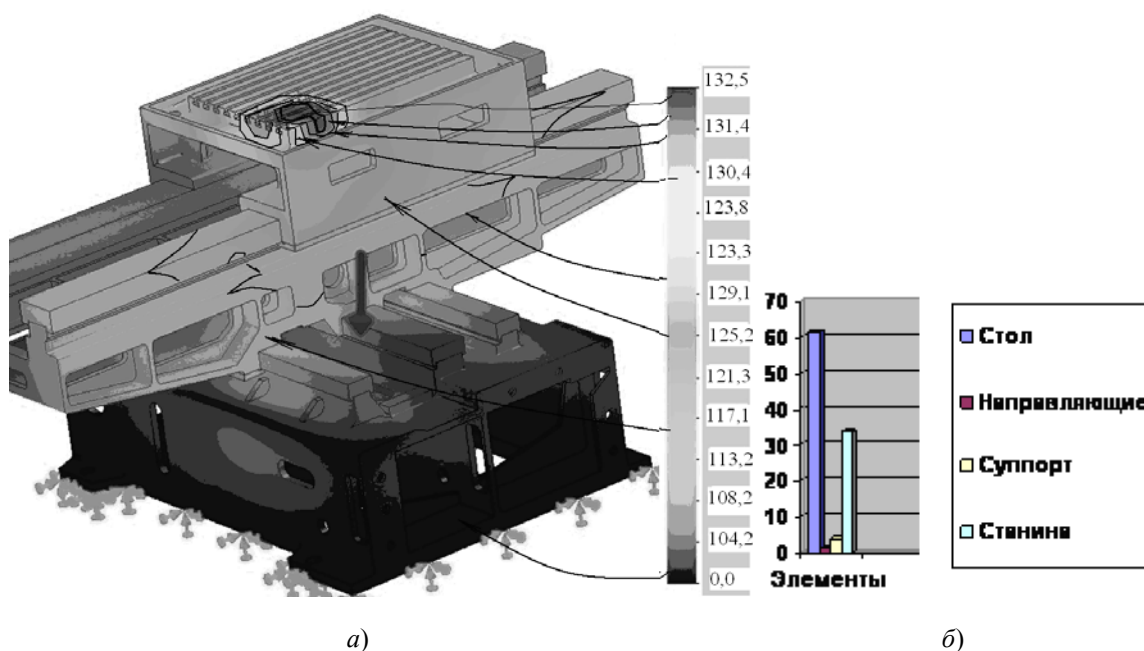


Рис. 5. Картина перемещений в сборке (а) и доли отдельных элементов в общей податливости (б)

Исследование модели крестового стола с применением полимерных накладок между плоскими поверхностями продольного, поперечного столов и направляющими выполняли по аналогичной методике. Результаты расчетов представлены на рис. 6 и 7.



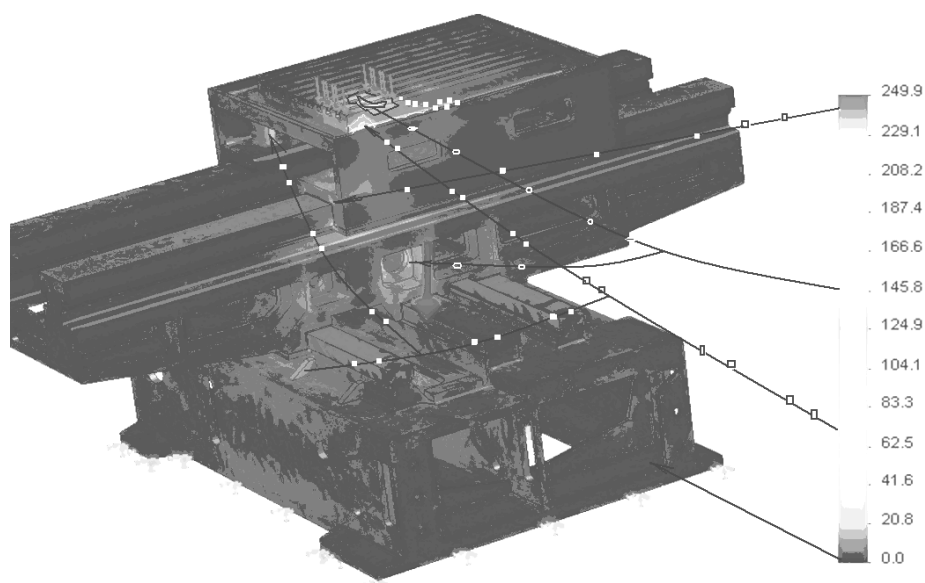


Рис. 6. Картина распределения напряжений в сборке

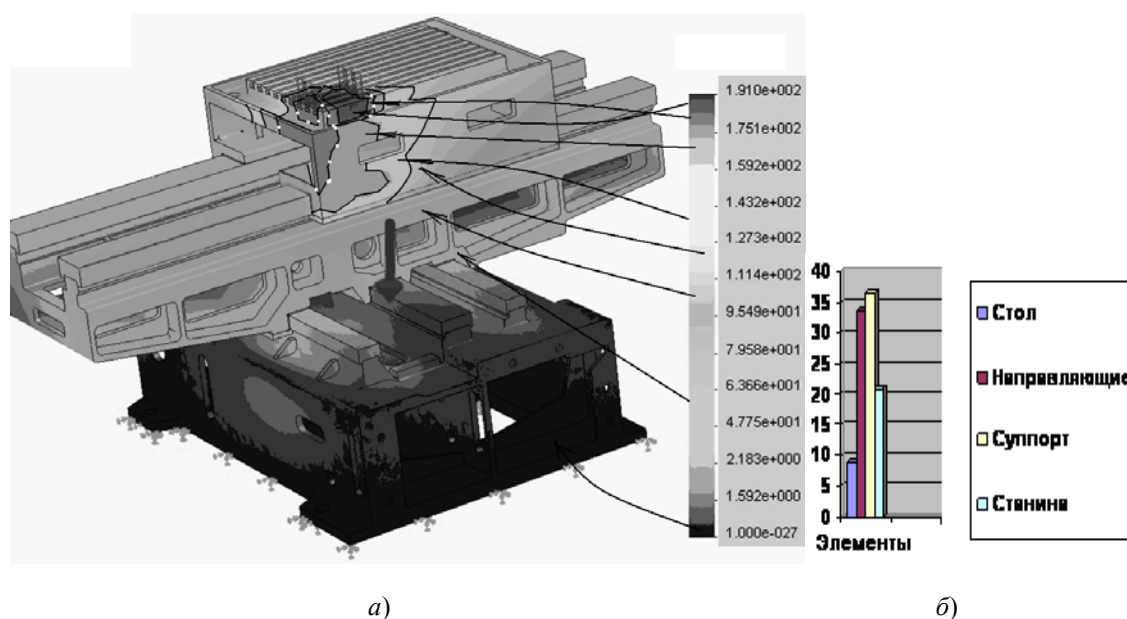


Рис. 7. Картина перемещений в сборке (а) и доли отдельных элементов в общей податливости (б)

Как видно на рис. 4 и 6, характер распределения напряжений и их уровень зависит от изменения материала направляющих. Анализ рис. 5, а и 7, а позволяет заключить, что произошло смещение зон максимальных перемещений и перераспределены доли податливостей отдельных элементов, что в совокупности привело к снижению статической точности на 0,058 мм.

Для оценки адекватности полученных результатов были проведены экспериментальные исследования статической точности стола, которые производились путем его нагружения посредством привода подачи шпиндельной бабки (рис. 8). Схема нагружения аналогична той, которая использовалась при испытаниях твердотельной модели крестового стола в интегрированной среде *CosmosWorks*. Максимальная приложенная нагрузка на стол составляла 4000 Н.

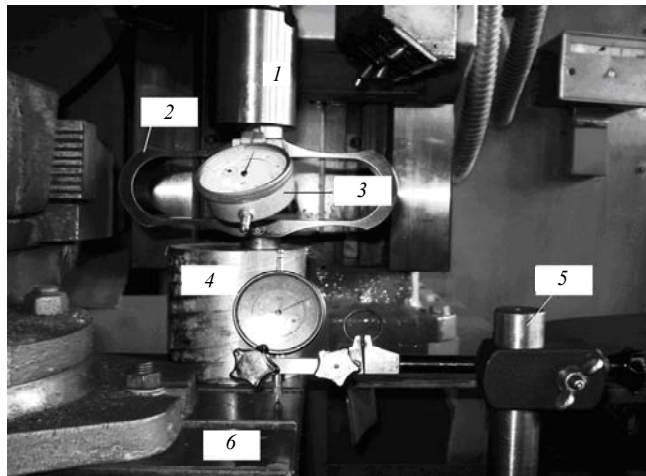


Рис. 8. Зона измерения статических перемещений:  
 1 – оправка; 2 – динамометр; 3 – измерительная головка; 4 – цилиндр;  
 5 – измерительная система; 6 – стол станка

Результаты испытаний представлены на рис. 9.

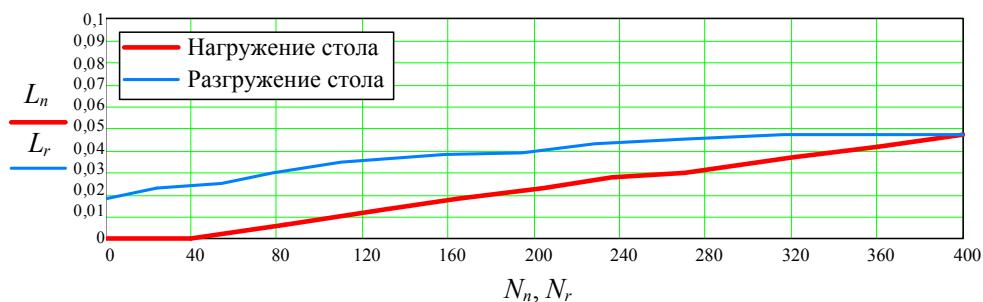


Рис. 9. Графики зависимостей перемещений стола от его нагружения и разгрузки

Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что максимальные статические перемещения с достаточной точностью согласуются с результатами расчетов.

### Заключение

Методами математического моделирования установлено, что одним из основных элементов, обуславливающим более 30 % податливости крестового стола, являются направляющие.

Стол и станина обладают достаточной жесткостью.

Геометрические параметры направляющих с композиционными накладками требуют оптимизации в зависимости от назначения станка.

### Литература

1. Решетов, Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. Туромша, В. И. Исследование жесткости продольно-фрезерного станка с подвижным порталом с помощью конечно-элементного моделирования / В. И. Туромша, С. С. Довнар, Туми эль-Мабрук Абузафер Али // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2010. – Вып. 25. – С. 270–277.

Получено 22.08.2011 г.

УДК 621.311

## СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

**Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, К. М. МЕДВЕДЕВ, Н. В. ПОТАПЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Функционирование энергосистем практически невозможно без многоуровневой автоматизированной системы диспетчерского управления [1]. Качественная работа диспетчера по оперативным переключениям в электрических сетях, регулированию режимных параметров энергосистем, взаимодействию с нижестоящими службами является одним из основных критериев надежного электроснабжения потребителей. Вместе с тем, специалисты, ведущие оперативные переговоры с диспетчером и выполняющие его распоряжения, должны, в свою очередь, грамотно и квалифицированно выполнять требуемые операции и заполнять необходимую документацию. Все это свидетельствует о том, что при подготовке специалистов для работы в энергосистемах необходимо уделять внимание и вопросам диспетчерского управления.

На кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого авторами данной статьи разработана лабораторная установка (стенд) «Пульт диспетчерского управления», предназначенная для первичного ознакомления студентов с оперативным управлением в энергосистемах. Ниже рассмотрены теоретические, практические и методические вопросы, которые решались при работе над установкой.

### Конструкция стенда

Структурная схема стенда приведена на рис. 1.

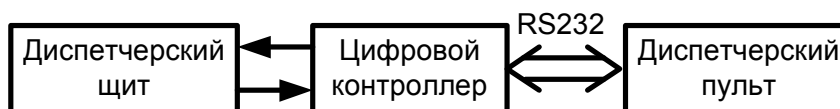


Рис. 1. Структурная схема стенда

Стенд представляет собой макет оперативно-информационного комплекса (ОИК) [2] и включает диспетчерский щит, цифровой контроллер и диспетчерский пульт. Внешний вид стенда приведен на рис. 2.

На диспетчерском щите изображена мнемосхема простейшей системы электроснабжения, состоящей из ТЭЦ и двух подстанций 110/10 кВ «Северная» и «Южная», которые соединены посредством трех линий электропередачи (ЛЭП) в кольцо. Данная схема представляет собой существенное упрощение реальных схем, так как в ней отсутствуют цепи резервирования на стороне 10 кВ подстанций, не выполняются условия по надежности электроснабжения потребителей, отсутствуют разъединители и т. д. Это упрощение введено для наглядности в учебных целях.

Помимо мнемосхемы на щите имеются тумблеры, имитирующие реальное положение высоковольтных выключателей, т. е. соответствующие сигналы телемеханики «Выключатель включен» или «Выключатель отключен». Положение тумблера

вверх означает включение выключателя, вниз – отключение. Внутри обозначений выключателей имеются светодиоды, которые отображают следующие виды информации:

- светодиод светится – выключатель включен;
- светодиод не светится – выключатель отключен;
- светодиод мигает – реальное положение выключателя не соответствует команде диспетчерского пульта.

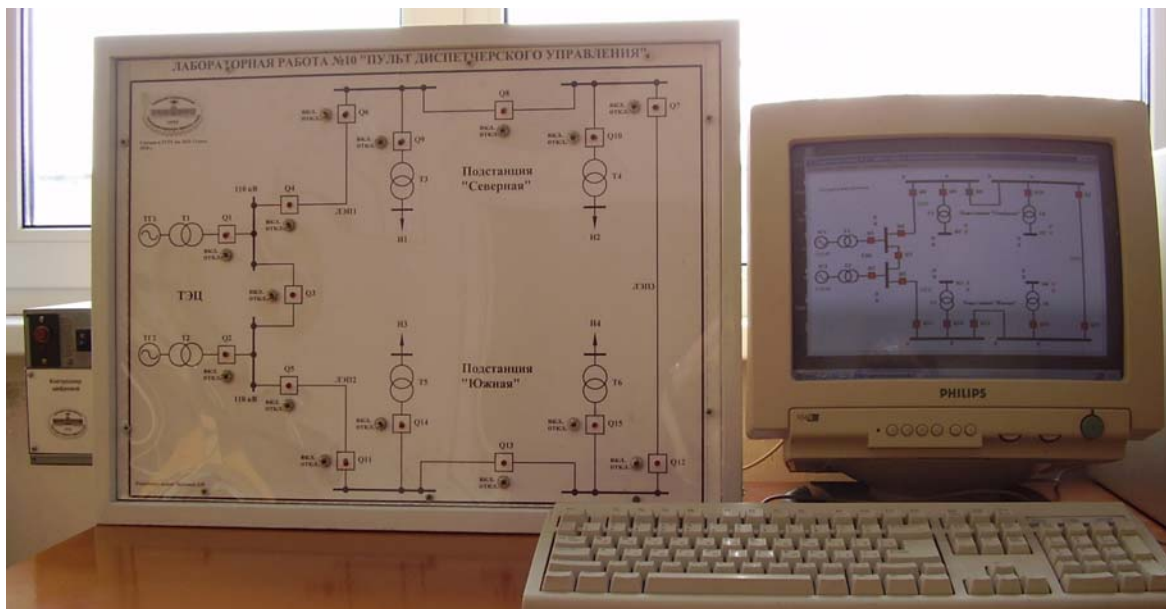


Рис. 2. Внешний вид лабораторного стенда

Функции диспетчерского пульта выполняет персональный компьютер (ПК).

Связь между щитом и диспетчерским пультом (ПК) осуществляется с помощью цифрового контроллера, прикрепленного к боковой части щита, посредством последовательного интерфейса RS-232. Контроллер реализован на основе однокристального микроконтроллера фирмы Atmel AT90S8535.

### Программное обеспечение

Для реализации функций диспетчерского пульта и его взаимодействия с контроллером в среде C++Builder была написана программа SupervisoryConsole, внешний вид главного окна которой приведен на рис. 3. Эта программа предназначена специально для выполнения лабораторной работы, но функционирует аналогично реальным программам, используемым в диспетчерских пунктах.

Программа SupervisoryConsole позволяет:

- осуществлять постоянный обмен данными с контроллером;
- отображать мнемосхему диспетчерского щита;
- вести расчет установившегося режима электрической сети вне зависимости от ее конфигурации (состояния выключателей);
- отображать модули и аргументы напряжений в узлах сети, а также значения активной и реактивной мощностей в узлах нагрузки;
- сигнализировать об отклонениях напряжения;
- изменять параметры силовых трансформаторов, ЛЭП и нагрузки;
- осуществлять оперативные переключения;
- моделировать случайные графики нагрузки в виртуальном времени.

Состояния выключателей программа SupervisoryConsole отображает следующим образом:

- красный цвет – выключатель отключен;
- зеленый цвет – выключатель включен;
- мигание – реальное положение выключателя не соответствует команде диспетчерского пульта.

Отклонения напряжения в узлах нагрузки программа SupervisoryConsole отображает следующим образом:

- черный цвет шин низкого напряжения подстанции – напряжение не выходит за границы предельно допустимых значений ( $\pm 10\%$  от номинального значения 10 кВ);
- синий цвет шин нагрузки – напряжение более чем на 10% выше номинального значения;
- красный цвет шин нагрузки – напряжение более чем на 10% ниже номинального значения.

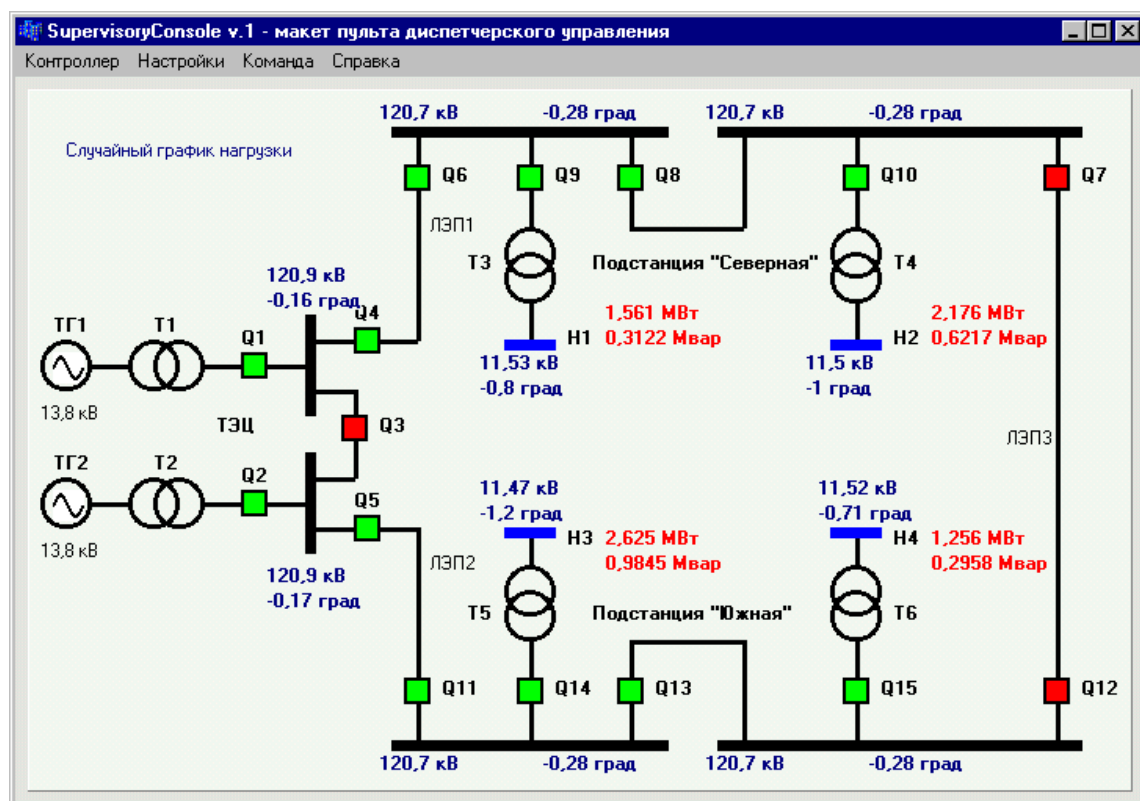


Рис. 3. Внешний вид главного окна программы SupervisoryConsole

Для ввода параметров схем замещения трансформаторов и ЛЭП, а также параметров нагрузки достаточно нажать мышью на обозначении соответствующих элементов и ввести данные в появившееся окно. Все параметры схем замещения трансформаторов и ЛЭП программой не рассчитываются, поэтому вводятся пользователем вручную. Изменение положения РПН также осуществляется только вручную. Это сделано в учебных целях.

Для изменения положения выключателя необходимо:

- 1) нажать мышью на обозначение требуемого выключателя;
- 2) прочитать текущее состояние выключателя и выбрать необходимое действие (как правило, если выключатель включен, то его отключают, или наоборот);
- 3) выдать требуемую команду на положение выключателя.

При вводе параметров нагрузки пользователь задает значения активной и реактивной мощности, соответствующие расчетному получасовому максимуму нагрузки при номинальном напряжении на шинах низкого напряжения подстанции. В процессе расчета установившегося режима программа SupervisoryConsole отображает значения активной и реактивной мощности нагрузки с учетом полученных значений напряжений в узлах.

Расчеты установившегося режима электрической сети программа SupervisoryConsole осуществляет совместно с пакетом MATLAB, реализуя циклический обмен данными через текстовые файлы. Этот пакет был выбран в силу простоты его соединения с другими программами, а также по причине отсутствия в среде разработки C++Builder (как и в других аналогичных средах) встроенных математических средств для работы с матрицами и многих функций для работы с комплексными числами. Очевидно, что необходимые алгоритмы расчета можно написать и в среде C++Builder, но это достаточно трудоемкий процесс.

При необходимости тиражирования лабораторного стенда в C++Builder может быть написан код, непосредственно взаимодействующий с библиотеками MATLAB и не требующий установки пакета MATLAB. Базовый набор библиотек MATLAB распространяется бесплатно.

В разработанном стенде алгоритмы расчета по методам узловых уравнений и обратной матрицы записаны в файле-сценарии MATLAB.

### Особенности расчетов

При написании алгоритмов для файла-сценария MATLAB авторы данной статьи столкнулись с задачей автоматического учета положений высоковольтных выключателей в конфигурации расчетной схемы сети. Эта задача имеет определенный научный уровень и достаточно слабо представлена в публикациях. Так, в классической монографии [3] она даже не упоминается.

Существующие программные пакеты типа RASTR позволяют вести расчет режимов электрической сети с учетом изменения положений выключателей в автоматическом режиме, принимая сигналы телемеханики. Однако подробные алгоритмы таких расчетов разработчиками программ не предоставляются из коммерческих соображений.

С позиций схемы замещения электрической сети идеальный выключатель имеет два значения проводимости: нулевое, когда он отключен, и бесконечное, когда он включен. В топологии сети это можно учесть, меняя значения элементов матрицы инцидентности (матрицы связности сети). Проблема заключается в том, как это делать автоматически непосредственно в программе для любой случайной конфигурации сети. Совершенно очевидно, что такой алгоритм вполне реализуем, но достаточно сложен.

Авторами данной статьи предлагается простая методика учета положений высоковольтных выключателей, состоящая в следующем. Каждый выключатель необходимо выделить в отдельную ветвь, проводимость которой может принимать два значения: высокое, но не бесконечное, и низкое, но не нулевое, что позволяет избежать деления на ноль при решении системы уравнений. Так, при написании файла-сценария MATLAB было принято значение проводимости включенного выключателя  $Y_{Q+} = 100 \text{ См}$ , что соответствует сопротивлению 0,01 Ом, а значение проводимости отключенного выключателя  $Y_{Q-} = 10^{-15} \text{ См}$ , что соответствует сопротивлению  $10^{15}$  Ом. Далее необходимо воспользоваться методом узловых уравнений [3], т. е. составить матрицу узловых проводимостей  $Y$  всей сети со всеми имеющимися выключателями независимо от их по-

ложения и матрицу-столбец токов в узлах  $\mathbf{I}$  для всех имеющихся источников питания. Тогда система уравнений запишется классически:

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{U}$  – матрица-столбец искомых напряжений в узлах.

Однако в исходном виде такая методика не работает. Дело в том, что, несмотря на очень малые значения проводимостей отключенных выключателей, сеть остается соединенной, и на сопротивлениях таких выключателей имеются падения напряжений. Так, например, если отключить все выключатели сети, напряжения в узлах не будут равны нулю, а распределятся согласно II закону Кирхгофа. Для устранения этого недостатка было найдено простое решение. Непосредственно после ближайших выключателей возле всех источников питания нужно условно подключить достаточно малую шунтирующую проводимость  $Y_{ш}$ , значение которой практически не скажется на режимах сети, но, вместе с тем, будет намного больше проводимостей отключенных выключателей. Такое подключение для схемы сети, используемой для стенда, показано на рис. 4.

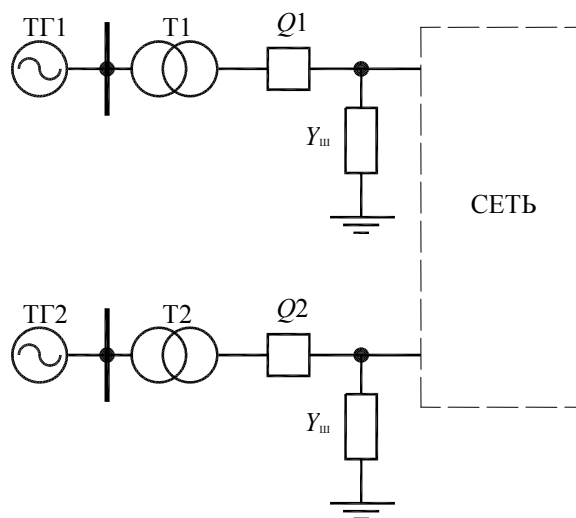


Рис. 4. Подключение условных шунтирующих проводимостей

При выборе значения  $Y_{ш}$  должно выполняться соотношение:

$$Y_{ш} \gg Y_{Q-}, \quad (2)$$

где  $Y_{Q-}$  – проводимость отключенного выключателя.

Если соотношение (2) выполняется, то при отключении выключателей  $Q1$  и  $Q2$  напряжения в узлах остальной сети (пунктир на рис. 4) будут близкими к нулю.

При написании файла-сценария MATLAB было принято значение  $Y_{ш} = 4 \cdot 10^{-9}$  См при  $Y_{Q-} = 10^{-15}$  См. Для напряжения 110 кВ это соответствует потребляемой мощности 28 Вт. Очевидно, что такое низкое значение мощности дополнительной нагрузки практически не скажется на результатах расчетов установившегося режима сети.

Решение системы (1) осуществлялось методом обратной матрицы, т. е. система считалась линейной при фиксированных значениях напряжений генераторов. При этом MATLAB позволяет решать и нелинейные системы уравнений, но, исходя из назначения стенда, было принято решение не усложнять алгоритмы.

Результаты работы файла-сценария MATLAB были проверены в стандартной программе расчета режимов электрических сетей Mustang для различных конфигураций рассматриваемой сети при различных мощностях нагрузок.

### **Применение стенда**

Разработанный стенд применяется на кафедре «Электроснабжение» для выполнения четырехчасовой лабораторной работы «Пульт диспетчерского управления» по дисциплинам «Автоматизация электрических сетей» и «Микропроцессорные устройства в энергетике» (в зависимости от специальности студентов).

Лабораторная работа состоит из двух занятий. На первом занятии студентам предлагается составить схемы замещения рассматриваемой сети в нормальном и ремонтном режимах, заполнить стандартный бланк переключений. Затем студенты выполняют расчет установившегося режима для обоих вариантов сети в программе Mustang и выбирают требуемые ступени РПН силовых трансформаторов для обеспечения номинального напряжения на шинах потребителей.

На втором занятии студенты работают непосредственно со стендом: запускают его, выполнив требуемые настройки, вводят параметры схемы замещения сети, устанавливают расчетные ступени РПН трансформаторов, производят необходимые переключения, согласовывая работу диспетчерского щита и диспетчерского пульта.

При выполнении лабораторной работы присутствует эффект увлекательной игры, что очень важно в психологическом плане для студентов вне зависимости от их возраста.

В результате выполнения работы студенты знакомятся с основными принципами работы оперативно-диспетчерского персонала, повышая свой квалификационный уровень.

### **Заключение**

Разработанный стенд имеет аппаратную часть и персональный компьютер, между которыми осуществляется обмен данными, что обуславливает его широкие функциональные возможности. Помимо рассмотренной области применения, стенд может быть использован для выполнения лабораторных работ по различным дисциплинам, связанным с электрическими сетями.

### **Литература**

1. Калентионок, Е. В. Оперативное управление в энергосистемах : учеб. пособие / Е. В. Калентионок, В. Г. Прокопенко, В. Т. Федин. – Минск : Высш. шк., 2007. – 351 с.
2. Митюшкин, К. Г. Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах / К. Г. Митюшкин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
3. Идельчик, В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

*Получено 08.02.2011 г.*



УДК 621.311.003.11

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ

**В. В. КРОТЕНОК, Ю. В. РАБСКАЯ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

При проектировании городских электрических сетей возникает задача планирования и размещения объектов электроснабжения – кабельных и воздушных линий, трансформаторных и силовых подстанций и т. п. Электроснабжение всех объектов, с одной стороны, должно быть достаточно по мощности и удовлетворять требованиям надежности питания потребителей различных категорий, а с другой стороны, должно быть экономически целесообразно организовано.

Вопрос о выборе места фактического размещения понижающей трансформаторной подстанции (ПТП) в нормативных документах [1]–[3] не рассматривается и не регламентируется, поскольку отсутствует практическая методика технико-экономического обоснования выбора места для размещения ПТП. Поэтому задача оптимального размещения ПТП на стадии проектирования является актуальной.

Критерием для выбора местоположения ПТП можно принять функцию оптимизации (1):

$$F(x, y) = x + y; \quad F(x, y) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $x$  – затраты на сооружение сети, р.;  $y$  – затраты на потери, р.

Затраты на сооружение определяют: место расположения подстанции, которое включает в себя длину кабельных или воздушных линий и их сечение, мощность понижающего трансформатора, график нагрузки и параметры сети.

Потери энергии зависят от графика нагрузки потребителей, типа трансформатора, длин проводников и их сечений. Выбор сечения проводников по критерию экономической плотности тока в общем случае не отвечает минимуму затрат и требует более точного экономического обоснования. Таким образом, значение функции затрат зависит от составляющих, обуславливающих затраты на сооружение подстанции и потери энергии.

Одним из вариантов решения поставленной задачи является размещение ПТП в центре электрических нагрузок, являющегося по своей сути аналогом центра масс [4], [5]. Однако такое решение является оптимальным только для случая однотипности потребителей по графику нагрузки. В общем случае это решение не обеспечивает оптимальности. Аналитическое решение рассматриваемого вопроса является сложной задачей из-за нерегулярной нагрузки потребителей, изменяющейся во времени. Наличие сложных функциональных зависимостей и множественность параметров делает поиск решения практически невозможным.

Выбор местоположения, типа, мощности и других параметров понижающей трансформаторной подстанции в основном обуславливается величиной и характером электрических нагрузок и размещением их на генплане и в производственных, архитектурно-строительных и эксплуатационных требованиях. Важно, чтобы ПТП располагалась как можно ближе к центру питаемых от нее нагрузок. Намеченное место расположения уточняется по условиям планировки предприятия, ориентировочным габаритам и типу (отдельно стоящая, пристроенная, внутренняя, закрытая, комплектная) подстанции.

На практике наиболее распространенными методами выбора места расположения подстанции являются методы медиан и центра масс (центр тяжести) [1], [2], [5], [8] основанные на методах, используемых в математике, механике и физике.

### Метод медиан

Нагрузки представляют собой совокупность точек лежащих на плоскости. Метод медиан заключается в разбиении этих точек на тройки (вершины треугольника) и нахождении в каждом таком треугольнике точки пересечения медиан. Затем полученные точки пересечения медиан опять выбираются в качестве вершин треугольников и находятся точки пересечения медиан. Это продолжается до тех пор, пока не получится единственная точка, которая и будет, согласно этому методу, оптимальным положением подстанции. Метод предусматривает количество нагрузок  $3^k$ , где  $k$  – любое целое число.

Медианы в рассматриваемом треугольнике задаются уравнением прямой, определяемой по выражению

$$kx + b = y. \quad (2)$$

Точка их пересечения определяется решением системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1x + b_1 = y; \\ k_2x + b_2 = y. \end{cases} \quad (3)$$

Суммарное расстояние от точки расположения подстанции до нагрузок будет определяться по формуле

$$S = \sum_{i=1}^k \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \quad (4)$$

где  $k$  – количество нагрузок,  $(x_i; y_i)$  – координаты  $i$ -й нагрузки;  $(x; y)$  – координаты подстанции.

Математическую модель метода медиан реализуется с помощью математического пакета MathCAD.

Ввод координат нагрузок осуществляется в два массива  $X_S$  и  $Y_S$ , для координат  $X$  и  $Y$  соответственно. Количество элементов в каждом массиве соответствует числу нагрузок  $k$ .

Далее, с помощью программного фрагмента описывается следующий алгоритм решения задачи:

а) проверка: лежат ли все точки на одной прямой:

- матричным способом решается система уравнений (3);
- по первым двум точкам  $(x_1; y_1); (x_2; y_2)$  составляется уравнение проходящей через них прямой (т. е. определяются коэффициенты  $k$  и  $b$ );
- при помощи цикла рассматривается принадлежность каждой точки  $(x_i; y_i)$  этой прямой. Если она принадлежит ей, то к вспомогательной переменной  $q$  прибавляется единица ( $q = q + 1$ );
- проверка, лежат ли все точки на одной прямой: значение переменной  $q$  должно быть равно  $k$  – количеству нагрузок. Если да, то прерывается выполнение дальнейшего программного фрагмента, если нет, то продолжается поиск координаты подстанции;
- б) нахождение координат оптимального расположения подстанции:
  - количество шагов цикла, за которое определяются конечные координаты, равно  $\log_3 k$ ;
  - количество рассматриваемых точек в массивах в зависимости от номера шага равно  $k/3^{n-1}$ ;
  - определяются координаты середин двух сторон треугольника;
  - после решения системы уравнений (3) находится точка пересечения прямых, представляющих собой медианы рассматриваемого треугольника;
  - сохраняется значение координат точки пересечения в том же массиве;
  - по окончанию цикла в матрицу  $RM$  записываются координаты расположения подстанции;
- в) по формуле (4) определяется суммарное расстояние от подстанции до нагрузок.

Листинг программного фрагмента определения координат расположения ПТП в MathCAD представлен на рис. 1.

**Исходные данные**

Количество нагрузок

$$k := 3$$

Координаты расположения нагрузок

$$s := 1..k$$

$$\text{ORIGIN} := 1$$

$$X_s := \quad Y_s :=$$

1	1
3	1
3	3

$$x_s := X_s$$

$$y_s := Y_s$$

Рис. 1. Листинг программы MathCAD (метод медиан) (окончание см. на с. 52)

```

RM:=
  A1 ← ( x1 1 )
        ( x2 1 )
  V1 ← ( y1 )
        ( y2 )
  R1 ← Isolve(A1, V1)
  k1 ← R11
  b1 ← R12
  q ← 2
  i ← 3
  while (q < k) ∧ (i ≤ k)
    q ← q + 1 if k1·x1 + b1 = y1
    i ← i + 1
  if q = k
    return "Все точки лежат на одной прямой"
  break

for n ∈ 1..log(k,3) otherwise
  i ← 1
  while i ≤ 3
    xm1 ← ( x1 + xi+2 ) / 2
    ym1 ← ( y1 + yi+2 ) / 2
    xm2 ← ( xi+1 + xi+2 ) / 2
    ym2 ← ( yi+1 + yi+2 ) / 2
    A1 ← ( xi+1 1 )
          ( xm1 1 )
    V1 ← ( yi+1 )
          ( ym1 )
    R1 ← Isolve(A1, V1)
    k1 ← R11
    b1 ← R12
    A2 ← ( x1 1 )
          ( xm2 1 )
    V2 ← ( y1 )
          ( ym2 )
    R2 ← Isolve(A2, V2)
    k2 ← R21
    b2 ← R22
    AM ← ( k1 -1 )
           ( k2 -1 )
    VM ← ( -b1 )
           ( -b2 )
    RM ← Isolve(AM, VM)
    xi+2 ← RM1 / 3
    yi+2 ← RM2 / 3
    i ← i + 3
  RM ← ( x1 )
        ( y1 )

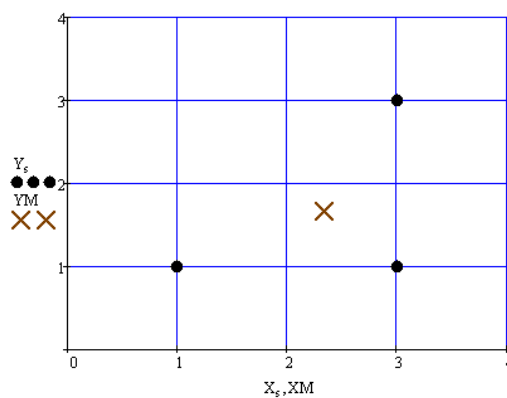
```

$$RM = \begin{pmatrix} 2.333 \\ 1.667 \end{pmatrix} \quad XM := RM_1 \quad YM := RM_2$$

Полученные координаты центра:

$$XM = 2.333 \quad YM = 1.667$$

Относительное расположение нагрузок и подстанции



Определяем суммарное расстояние от центра до рассредоточенных нагрузок:

$$S_4 := \sum_{s=1}^k \sqrt{(X_s - XM)^2 + (Y_s - YM)^2} \quad S_1 = 3.924$$

Рис. 1. Окончание (начало см. на с. 51)

**Метод центра масс**

Центр масс – геометрическая точка, положение которой характеризует распределение масс в теле или механической системе.

Координаты центра масс определяются формулами:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum m_k x_k}{M}; \\ y_c &= \frac{\sum m_k y_k}{M}; \\ z_c &= \frac{\sum m_k z_k}{M}. \end{aligned} \tag{5}$$

Для простоты расчетов принимается мощность нагрузок одинаковая во всех точках, равная 1 о. е. Тогда координаты ПТП определяются по выражениям:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}; \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k}, \tag{6}$$

где  $k$  – количество нагрузок;  $(x_i; y_i)$  – координаты  $i$ -й нагрузки;  $(x_c; y_c)$  – координаты подстанции.

По формуле (6) определяются координаты центра масс ( $XМ; YМ$ ).

На плоскости отображаются нагрузки в виде точек с соответствующими координатами и полученные координаты подстанции.

По формуле (4) определяется суммарное расстояние от подстанции до нагрузок. Листинг программного фрагмента определения координат расположения ПТП в MathCAD (метод центра масс) представлен на рис. 2.

**Исходные данные**

Количество нагрузок

$$k := 3$$

Координаты расположения нагрузок

$$s := 1..k$$

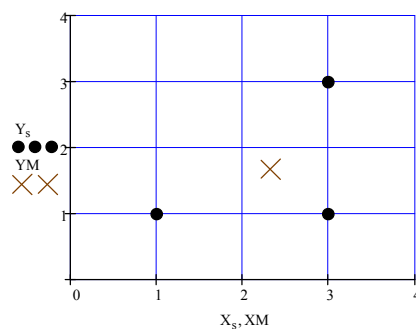
$$XМ := \frac{\sum_{n=1}^k X_n}{k} \quad YМ := \frac{\sum_{n=1}^k Y_n}{k}$$

Полученные координаты центра:

$$XМ = 2.333$$

$$YМ = 1.667$$

Относительное расположение нагрузок и подстанции



$$S_2 := \sum_{s=1}^k \sqrt{(X_s - XМ)^2 + (Y_s - YМ)^2}$$

$$S_2 = 3.924$$

Рис. 2. Листинг программы MathCAD (метод центра масс)

**Метод итерационного решения систем (метод сопряженных градиентов)**

Сущность метода состоит в следующем [6]:

– к искомому точному решению  $x^*$  системы  $Ax = b$  строится последовательность приближенных решений  $x_0, x_1, \dots, x_k, \dots$ ;

– каждое очередное приближение дает оценку точного решения с все уменьшающейся погрешностью;

– оценка точного решения может быть получена с любой требуемой точностью.

Если матрица  $A$  симметричная и положительно определенная, то функция, определяемая выражением

$$q(x) = \frac{1}{2} x^T \cdot A \cdot x - x^T b + c, \quad (7)$$

имеет единственный минимум, который достигается в точке  $x^*$ , совпадающей с решением системы уравнений.

Итерация метода сопряженных градиентов состоит в вычислении очередного приближения к точному решению выражения

$$x^k = x^{k-1} + s^k t^k, \quad (8)$$

где  $x^k$  – очередное приближение;  $x^{k-1}$  – приближение, построенное на предыдущем шаге;  $s^k$  – скалярный шаг;  $t^k$  – вектор направления.

Далее приведен алгоритм сопряженных градиентов для минимизации функций общего вида [6], [7].

**Шаг 1.** Вычисление антиградиента в произвольной точке  $x_{(0)}$ :

$$d_{(0)} = -f'(x_{(0)}).$$

**Шаг 2.** Вычисление вектора направления:

$$t^k = -d^k + \frac{((d^k)^T, d^k)}{((d^{k-1})^T, d^{k-1})} t^{k-1}.$$

**Шаг 3.** Вычисление величины смещения по выбранному направлению:

$$s^k = \frac{(t^k, d^k)}{((t^k)^T \cdot A \cdot t^k)}.$$

**Шаг 4.** Вычисление нового приближения:

$$x^k = x^{k-1} + s^k t^k.$$

Результаты вычислений поиска минимума целевой функции (4) (координат расположения ПТП) методом сопряженных градиентов показывают, что расположение ПТП дает меньшую сумму длин кабельных линий от ПТП до нагрузок. На рис. 3 представлен листинг программы MathCAD, где реализовано решение задачи методом сопряженных градиентов и отображен график расположения ПТП по результатам расчетов методов центра масс и поиска минимума целевой функции.

```

f(x,y) = sum_{i=1}^k sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}
x := 0      y := 0
Given
(min(X) <= x) <= max(X) (min(Y) <= y) <= max(Y)  Интервал ограничений для поиска минимума ф-ции
P := Minimize(f,x,y)  Определяются координаты минимума методом сопряженных градиентов
P = (2.577)
    (1.423)
f(P_1,P_2) = 3.864  Определение суммы длин от полученных координат до нагрузок
    
```

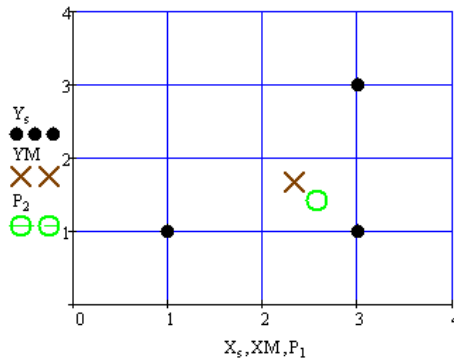


Рис. 3. Листинг программы MathCAD (метод сопряженных градиентов)

### Заключение

1. Решение задачи минимизации затрат является актуальным, позволяющим проектировать более экономичные сети.
2. Размещение ПТП в центре электрических нагрузок не обеспечивает минимум затрат.
3. Метод медиан и центра масс для нахождения координат ПТП дают одинаковые результаты. При координатах трех нагрузок {1;1 3;1 3;3} координаты ПТП {2,333; 1,667}, а сумма длин кабельных линий 3,924.
4. Использование методов оптимизации для поиска координат ПТП оказалось целесообразным. При тех же условиях найденные координаты ПТП методом сопряженных градиентов {2,557; 1,423}, а сумма длин кабельных линий 3,864. Эффект от применения метода сопряженных градиентов составил 1,53 %.

### Литература

1. РД 34.20.185–94. Инструкция по проектированию городских электрических сетей / МТЭ Рос. Федерации, РАО ЕЭС Рос. Федерации. – М., 1994.
2. СН 541–82. Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов / Госгражданстрой. – М., 1982.
3. СНиП 2.07.01–89. Строительные нормы и правила. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / Госкомархитектуры. – М., 1989.
4. Гринкруг, М. С. Задача проектирования системы электроснабжения на основе минимизации приведенных затрат / М. С. Гринкруг, С. А. Гордин // Двенадцатая всерос. науч.-техн. конф. «Энергетика, экология, надежность, безопасность». – Томск, 2006.
5. Местоположение и размещение подстанций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2001/eltf/dey/ellib/ct2.htm>.

6. Branch, M. A., T. F. Coleman, and Y. Li, "A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems," *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 21, Number 1, pp. 1–23, 1999.
7. Sorensen, D. C., "Minimization of a Large Scale Quadratic Function Subject to an Ellipsoidal Constraint," Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Technical Report TR94-27, 1994.
8. Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б. Ю. Липкин. – М. : Высш. шк., 1990.

*Получено 30.03.2011 г.*



УДК 621.313.333

## ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

**Ю. Ю. ДЕНИСЮК**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования в промышленности. Назначением диагностики является выявление и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурса.

Практически мгновенная реакция вибросигнала на изменение состояния оборудования является незаменимым качеством в аварийных ситуациях, когда определяющим фактором является скорость постановки диагноза и принятия решения.

Вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования позволяют:

- уточнить причины дефекта и условия его возникновения и развития, оценить влияющие факторы;
- вовремя устранить дефект или увеличить среднюю наработку парка на проявление дефекта (отказа);
- снизить интенсивность проявления дефекта (отказа) при наиболее ответственных режимах работы и эксплуатации машины;
- улучшить организацию работ по разработке и внедрению мероприятий, направленных на устранение дефекта;
- оценить эффективность мероприятий, направленных на устранение дефекта, и выбрать для внедрения наиболее эффективные;
- получить чисто экономический эффект благодаря снижению затрат на внедрение мероприятий, предотвращающих дефект или устраняющих неисправность, и затрат производства на изготовление деталей;
- оценить возможный эффект от разработанных и внедренных мероприятий на ранней стадии, что очень важно, так как полное проявление действия этих мероприятий зависит от наработки изделия после их внедрения и может быть отделено от момента внедрения длительным временем (1–2 года и более);
- ускорить процесс восстановления эксплуатационной надежности парка машин и управлять им;
- облегчить взаимодействие изготовителя машин и ее заказчика (эксплуатационника) в конфликтных ситуациях, особенно в начальном периоде массового проявления дефектов и организации действия по их устранению.

В то же время использование диагностики может вызвать некоторый отрицательный эффект. Отрицательные эффекты при внедрении системы вибромониторинга на предприятии следующие:

- увеличение досрочных (временных) выводов изделий из эксплуатации;

- неизбежность «необоснованных» съемов изделий с эксплуатации вследствие ложных диагнозов;
- возможность пропуска в дальнейшую эксплуатацию некоторой части ненадежных изделий (особенно на начальном этапе использования диагностики);
- вероятность чисто экономической неэффективности внедрения диагностики (например, при малом количестве эксплуатируемых изделий);
- необходимость проведения сложных и трудоемких исследований для разработки методик и средств диагностирования конкретных дефектов.

Данные отрицательные факторы, снижающие эффективность диагностики, обусловлены следующими причинами:

- обычно встречающимся на практике неполным представлением о дефекте, его причинах, условиях возникновения и факторах, влияющих на его появление и развитие, а также началом разработки методик диагностики конкретного объекта по конкретному дефекту при неполном представлении о дефекте в целях сокращения сроков обеспечения надежности парка оборудования;
- необходимостью диагностирования по параметрам, являющимся лишь частью комплекса факторов, связанных с дефектом, а также технической невозможностью проведения исследований для разработки методик диагностирования в объеме, дающем полную информацию;
- необходимостью принятия компромиссных решений при установлении границ (норм) в условиях недостаточно четкой и полной оценки альтернативных факторов, а также недостаточно полной информацией о возможных альтернативах и их последствиях (особенно это относится к информации интуитивного характера), выдаваемой при постановке задачи диагностики и подготовке решений лицами, ставящими задачу и принимающими решение.

### **Постановка задач**

Вибродиагностика, являясь разделом технической диагностики, есть отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов распознавания технических состояний машин и механизмов по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале.

Основным физическим носителем информации о состоянии элементов работающего оборудования в вибродиагностике является виброакустический сигнал – собирательное понятие, включающее информацию о колебательных процессах (вибрационных, гидро- или газодинамических и др.) и акустическом шуме механизма в окружающей среде. Следовательно вибродиагностированию может подвергаться любое оборудование, функционирование которого сопровождается возбуждением колебательных процессов.

Вибродиагностирование электрических машин позволяет вовремя выявить развивающиеся дефекты, которые в будущем могут привести к аварийному выходу из рабочего состояния. Точность определения дефекта зависит от ряда факторов, среди которых имеют место следующие ошибки:

- *ошибка первого рода*: пропуск дефекта, т. е. в электрической машине имеется дефект, но специалист по диагностированию не умеет его выявить;
- *ошибка второго рода*: исправная электрическая машина бракуется специалистом по вибродиагностированию.

Указанные выше ошибки обусловлены следующими причинами:

- неопределенности в процессе диагностирования;
- помехи в процессе диагностирования;
- погрешности, возникающие в процессе диагностирования.

### **Решение задач**

Неопределенности в процессе диагностирования обусловлены следующими причинами:

**1. Отсутствие информации о подшипниках качения.** При отсутствии информации о подшипниках качения, по которым определяются информативные частоты, допускается приблизительно вычислять значение информативных параметров вибрации.

Оценим абсолютную погрешность приближенного определения информативных частот для 20 типов подшипников. Для этого рассчитаем следующие информативные частоты: частоту вращения сепаратора подшипника ( $f_{01}$ ); частоту, на которой проявляется дефект увеличения зазора между телами качения и кольцами подшипника ( $f_2$ ); частоту, на которой проявляется дефект износа поверхности тел качения, сепаратора и старения смазки ( $f_5$ ); частоту, на которой проявляется дефект износа поверхности тел качения и внутреннего кольца ( $f_5 - f_p$ ). Перечисленные выше частоты рассчитаем сначала по точным формулам, а затем по приближенным.

Приведем формулы для точного расчета информативных частот для указанных дефектов:

- Частота вращения сепаратора подшипника [2]:

$$f_{01} = \frac{f_p \cdot R_{\text{вн}}}{2(R_{\text{вн}} + r_{\text{ш}})}, \quad (1)$$

где  $f_p$  – частота вращения ротора электрической машины;  $R_{\text{вн}}$  – радиус внутренней поверхности, по которой перемещается тело качения:

$$R_{\text{вн}} = \frac{d + D}{4} - r_{\text{ш}}, \quad (2)$$

$d$  – диаметр внутреннего кольца;  $D$  – диаметр наружного кольца;  $r_{\text{ш}}$  – радиус тел качения.

- Частота, на которой проявляется дефект увеличения зазора между телами качения и кольцами подшипника [2]:

$$f_2 = \frac{f_p \cdot R_{\text{вн}} \cdot Z_{\text{ш}}}{2(R_{\text{вн}} + r_{\text{ш}})}, \quad (3)$$

где  $Z_{\text{ш}}$  – число тел качения.

С частотой  $f_2$  происходит опрокидывание вала двигателя на подшипниках качения.

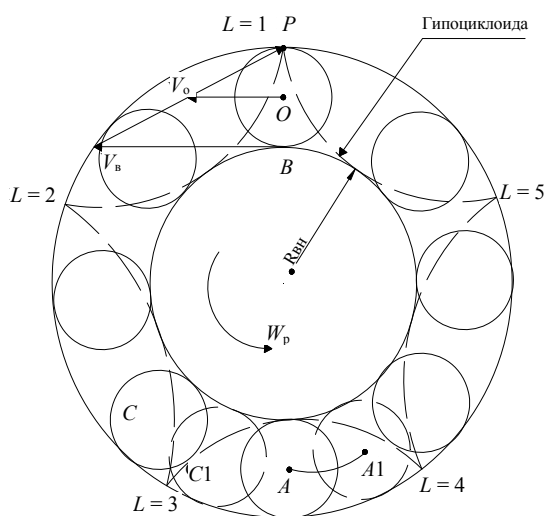


Рис. 1. К определению частоты вращения сепаратора

Положение вала и тел качения, когда центр вала совпадает с центром тела качения (позиция  $A$ ) является не устойчивым. Так как вал вращается, то перемещаются и тела качения. При перемещении шарика с позиции  $A$  в  $A_1$  происходит опрокидывание вала на тело качения  $C$  ( $C_1$ ). Чем больше зазор между поверхностью тела качения и кольцами, тем больше скорость удара вала по шароку в подшипнике:

$$\vartheta = h \sqrt{\frac{F}{R_{\text{вн}} + r_{\text{ш}}} \sin\left(\frac{\pi}{Z_{\text{ш}}}\right)}, \quad (4)$$

где  $F$  – сила, действующая в точке наружной обоймы и тел качения.

Уровень вибрации на частоте  $f_2$  пропорционален величине радиального зазора в подшипнике.

• Частота, на которой проявляется дефект износа поверхности тел качения, сепаратора и старения смазки [2]:

$$f_5 = \frac{f_p \cdot R_{\text{вн}}}{2 \cdot r_{\text{ш}}}. \quad (5)$$

Для приближенного расчета необходимо вычислить переводной коэффициент для каждого подшипника на каждой информативной частоте:

$$K_1 = \frac{f_{01}}{f_{06}}, \quad (6)$$

где  $f_{06}$  – обратная частота вала двигателя.

Тогда для вычисления информативных частот получаем:

$$f_{01}^I = K_1 \cdot f_{06}; \quad (7)$$

$$f_2^I = K_1 \cdot f_{06} \cdot Z_{\text{ш}}, \quad (8)$$

где  $f_{01}^I$  – приближенное значение частоты вращения сепаратора подшипника;  $f_2^I$  – приближенное значение частоты, на которой проявляется дефект увеличения зазора между телами качения и кольцами подшипника.

Приведем пример расчета приближенных значений информативных частот для подшипника № 210:

$$K_1 = \frac{20,46}{50} = 0,4;$$

$$f_{01}^I = 0,4 \cdot 50 = 20 \text{ Гц.}$$

Результаты расчета для остальных подшипников аналогичны и приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Точные и приближенные значения информативных частот подшипников качения, при частоте вращения ротора 3000 об/мин**

Номер подшипника качения	Вид расчета	$f_{01}$ , Гц	$f_2$ , Гц	$f_5$ , Гц	$f_p - f_0$ , Гц	$f_5 - f_p$ , Гц
210	точный	20,46	204,6	112,79	29,5	62,79
	приближенный	20	205	113	30	63

Окончание табл. 1

Номер подшипника качения	Вид расчета	$f_{01}$ , Гц	$f_2$ , Гц	$f_5$ , Гц	$f_p - f_0$ , Гц	$f_5 - f_p$ , Гц
304	точный	18,38	128,6	69,53	31,6	19,53
	приближенный	20	130	70	30	20
305	точный	18,39	128,7	69,56	31,6	19,5
	приближенный	20	130	70	30	20
306	точный	18,97	151,76	78,65	31	28,65
	приближенный	20	150	80	30	30
307	точный	18,78	131,46	75,57	31,2	25,57
	приближенный	20	130	75	30	25
308	точный	19,2	153,6	82,75	30,8	32,75
	приближенный	20	155	83	30	33
7A309	точный	18,97	151,8	78,8	31,03	28,8
	приближенный	20	150	80	30	30
7A310	точный	19,04	152,3	79,9	30,96	29,9
	приближенный	20	150	80	30	30
312	точный	19,12	152,9	81,34	30,8	31,3
	приближенный	20	155	80	30	30
7A313	точный	19,19	153,5	82,6	30,8	32,6
	приближенный	20	155	85	30	35
314	точный	19,2	153,8	83,26	30,78	33,2
	приближенный	20	155	85	30	35
7A315	точный	19,25	154	83,8	30,7	33,8
	приближенный	20	155	85	30	35
7A317	точный	19,02	152,17	84,8	30,9	34,8
	приближенный	20	150	85	30	35
7A320	точный	19,2	153,6	82,8	30,8	32,8
	приближенный	20	155	85	30	35
4A176309	точный	18,97	208,8	78,8	31	28,8
	приближенный	20	210	80	30	30
309	точный	18,97	132,7	78,8	31	28,8
	приближенный	20	135	80	30	30
4A176310	точный	19,04	209,4	79,9	30,9	29,9
	приближенный	20	210	80	30	30
A346310	точный	19,04	209,4	79,9	30,9	29,9
	приближенный	20	210	80	30	30
8A346320	точный	19,2	230,4	82,8	30,8	32,82
	приближенный	20	230	85	30	35
B366322	точный	19,1	210	80,9	30,9	30,98
	приближенный	20	210	80	30	30

В табл. 1 рассчитаны информативные частоты для 20 типов подшипников качения [4]: верхнее значение соответствует точному расчету; нижнее значение соответствует приближенному расчету. Из приведенного расчета можно оценить абсолютную погрешность приближительной оценки информативных параметров вибрации на каждой отдельно взятой частоте.

Результаты оценки абсолютной погрешности приближенного определения информативных частот сведем в табл. 2.

Таблица 2

**Значения абсолютной погрешности при приближенном определении информативных частот**

Информативная частота	$f_{01}$ , Гц	$f_2$ , Гц	$f_5$ , Гц	$f_p - f_0$ , Гц	$f_5 - f_p$ , Гц
Значение средней абсолютной погрешности, Гц	-0,93	-0,32	-0,69	1	-0,69

Из табл. 2 видно, что абсолютная погрешность приближенного определения информативных частот не превышает допустимое отклонение, равное  $\pm 4$  Гц. Так как допустимая абсолютная погрешность приближенного определения информативных частот вибрации равна  $\pm 4$  Гц, то прибор для измерения вибрации должен иметь шаг измерения равный 8 Гц.

**2. Отсутствие статистических данных о динамике износа.** Для решения данной задачи необходимо иметь четкое представление о физике работы подшипника качения. При работе подшипника качения шарик совершает три вида движения, а именно: вращение, скольжение и качение [2]. В то же время траекторией движения каждой точки шарика является гипоциклоида, которая показана на рис. 1. Характеристикой гипоциклоиды является кратность гипоциклоиды, которая определяется следующим образом:

$$K_p = \frac{L_{\text{нар}}}{L_{\text{ш}}}, \quad (9)$$

где  $L_{\text{нар}}$  – длина окружности наружного кольца подшипника, которая определяется как:

$$L_{\text{нар}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{нар}}; \quad (10)$$

$L_{\text{ш}}$  – длина окружности шарика, которая определяется как:

$$L_{\text{ш}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{ш}}. \quad (11)$$

В результате подстановки формул (10) и (11) в формулу (9) получаем:

$$K_p = \frac{r_{\text{нар}}}{r_{\text{ш}}}. \quad (12)$$

Вероятность того, что кратность гипоциклоиды окажется целым числом, бесконечно мала, отсюда следует, что вероятность соприкосновения шарика с поверхностью наружного кольца в одной и той же точке также бесконечно мала. Поэтому решать проблему отсутствия статистических данных о динамике износа можно следующим образом: при измерении вибрации в конкретной реперной точке определяется усредненное значение вибрации по 4–8 значениям. Далее, не перемещая дат-

чик, проводится 3–4 измерения спектра вибрации в этой точке. Если имеется износ каких-либо узлов подшипника, то на соответствующих частотах вибрации, на основании измерений, проявится резкий скачок уровня вибрации. Чем больше эта разница, тем большим будет износ подшипника.

**3. Сложностью определения предельных значений параметров вибрации для каждого механизма.** Решение этой задачи производится несколькими способами:

- 1) принять за основу рекомендации международных и государственных стандартов;
- 2) принять в качестве граничных значений рекомендации зарубежных или отечественных ученых;
- 3) в качестве граничных значений можно принимать огибающие верхних и нижних значений амплитуд вибрации на информативных частотах.

При построении верхних граничных значений вибрации электрической машины руководствуются следующей методикой:

- 1) определяются информативные частоты для типовых дефектов;
- 2) назначается выборка диагностируемого оборудования в количестве 10–15 единиц, находящегося длительное время в эксплуатации до ремонта;
- 3) на каждой информативной частоте вибрации электрической машины данной выборки выбирается максимальное значение амплитуды.
- 4) полученные точечные данные на информативных частотах соединяются ломаной линией, которая и будет представлять графическое изображение верхних граничных значений виброакустической характеристики диагностируемого оборудования.

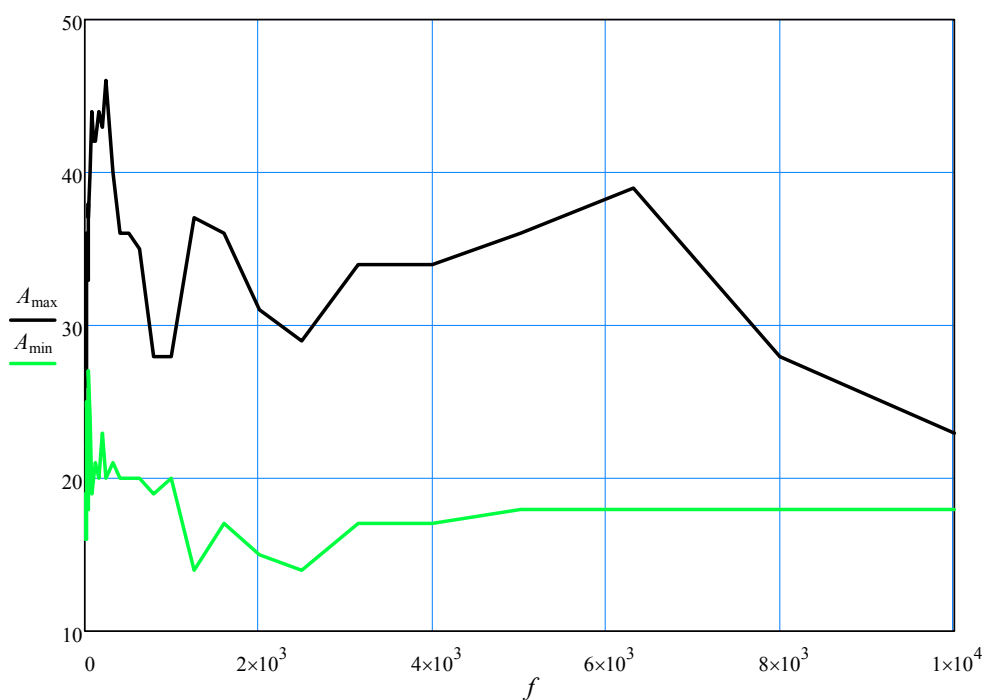


Рис. 2. К определению верхних и нижних граничных значений вибрации

В результате получаем виброакустическую характеристику условного механизма, содержащего все типовые дефекты данного типа оборудования.

Полученные граничные значения можно сравнить с международными или государственными стандартами. Если эти цифры оказались больше стандартных, то выборка механизмов для построения верхних граничных значений принята правильно, в противном случае в выборке оказались механизмы с хорошим техническим состоянием.

Аналогичным образом определяют нижнее граничное значение вибрации, только в данном случае на каждой информативной частоте из заданной выборки выбирают минимальные значения амплитуды вибрации.

В результате получаем виброакустическую характеристику идеального условного механизма, не содержащего ни одного типового дефекта. Имея виброакустическую характеристику диагностирования механизма, эти две характеристики позволяют успешно оценивать техническое состояние нового механизма, а также прогнозировать и вычислять остаточный ресурс.

### Помехи в процессе диагностирования

Рассмотрим помехи и способы уменьшения влияния этих помех на точность диагностирования.

1. **Несинусоидальность напряжения в сети:** несимметрия фазного напряжения до 3 % вызывает увеличение вибрации на 8–12 дБ на частотах  $f_1$ ,  $2f_1$  и  $4f_1$ . Поэтому перед началом измерения целесообразно проверить качество фазного напряжения.

2. **Работающие рядом механизмы** при условии, что дискретные частоты вибрации подшипников качения исследуемого объекта и механизма – помехи одинаковы. Предварительно измеряется амплитудный и частотный спектр помехи на неработающем механизме, который диагностируется. Если уровень вибрации помехи на информативных частотах диагностируемого объекта по эталонной характеристике меньше на 6–10 дБ, то влияние сигнала (по предыдущему замеру) помехи не учитывается. Если уровень сигнала помехи на диагностируемых частотах равен полезному сигналу, то возможны два решения: остановить механизм-помеху на время диагностирования или учесть величину приращения полезного сигнала под влиянием помехи согласно графику:

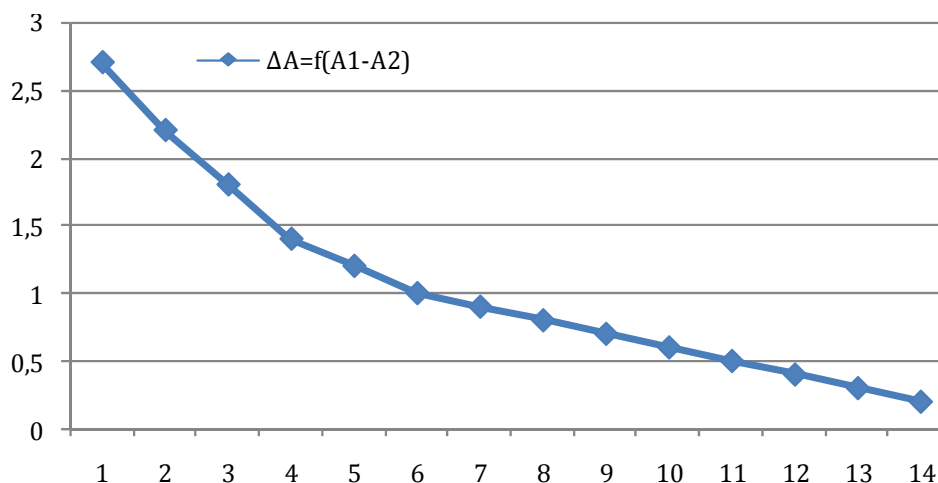


Рис. 3. К определению уровня вибрации с учетом помех

Если существует два акустических источника, уровни вибрации которых в какой-то точке акустического поля соответственно равны  $A_1$  и  $A_2$ , причем  $A_1 \gg A_2$ , то результирующий уровень  $A$  в той же точке равен:

$$A = A_1 - \Delta A. \quad (13)$$

Величина  $\Delta A$  определяется из рис. 3 в функции  $A_1 - \Delta A$ .

При проведении диагностирования следует понимать, что, если мы диагностируем электрическую машину, то в качестве помехи будут выступать рядом работаю-



щие механизмы; если же мы диагностируем работающие механизмы, то в качестве помехи будет выступать уже электрическая машина.

**3. Положение датчиков на лапе, корпусе и подшипниковых щитах.** Датчик, закрепленный на окрашенной поверхности лапы, а потом – непосредственно на металлической поверхности, регистрирует различный уровень вибрации. Место установки датчика следует выбирать в зависимости от решаемой задачи.

#### **Погрешности, возникающие в процессе диагностирования**

В процессе измерений виброакустических сигналов возникают погрешности: инструментальная, методическая и субъективная. Инструментальная погрешность обусловлена погрешностью применяемых приборов. Методические погрешности могут возникнуть из-за несовершенства разработки теории вибрации, положенной в основу метода измерений; неточности соотношений, используемых для нахождения оценки признаков вибрации и их причины, а также из-за несоответствия измеряемой величины и ее диагностической модели. Они появляются в результате методических и организационно-технических ошибок в ходе измерения и обработки виброакустических сигналов [1].

#### **Заключение**

1. Специалист должен знать физические процессы, происходящие в объектах диагностирования.

2. Специалист должен уметь проводить измерения сигналов вибрации и работать с виброизмерительными приборами. А также при наличии помех и неопределенностей мог применить описанные выше методики для исключения причин, оказывающих влияние на точность результата диагностирования.

3. Для повышения эффективности диагностики при ее практическом использовании важно, чтобы лица, принимающие решения и ставящие задачи диагностики, ясно понимали тот факт, что диагностика проводится в условиях неполноты и неопределенности информации, и поэтому неизбежен компромисс между пропусками дефекта и необоснованными заключениями о неисправности объекта.

4. Специалист должен уметь обрабатывать сигналы вибрации и выдавать на основании результатов измерений правильное заключение о техническом состоянии объекта диагностирования.

#### **Литература**

1. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Библиогр., 1996. – 276 с.
2. Грунтович, Н. В. Техническое диагностирование элементов атомной энергетической установки / Н. В. Грунтович. – Севастополь, 1984. – Ч. I. Методика прогнозирования технического состояния корабельных электрических машин и насосов. – 92 с.
3. Вибродиагностика : монография / под ред. Г. Ш. Розенберга. – СПб. : ПЭИПК, 2003. – 284 с.
4. Байзельман, Р. Д. Подшипники качения : справочник / Р. Д. Байзельман, Б. В. Цыпкин, Л. Я. Перель. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 572 с.

*Получено 03.03.2011 г.*

УДК 62-83-52

## ОСОБЕННОСТИ ИММИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ КОММУТАЦИИ И ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ

**В. С. ЗАХАРЕНКО, И. В. ДОРОЩЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Известная модель асинхронного электродвигателя [1] справедлива для схемы включения статорных обмоток «звезда с нейтралью» и для случая, когда статорные обмотки не имеют общей точки (например, при питании от НПЧ). Для исследования динамики при питании статора двигателя от автономного инвертора и при несимметричных схемах включения необходимо работать с линейными напряжениями. Кроме того, уравнения должны быть разрешены относительно производных токов для обеспечения удобства учета коммутации силовых полупроводниковых приборов.

### Вывод модели

Вычтем попарно друг из друга уравнения электрического равновесия статора для получения линейных напряжений. Уравнения для ротора оставим без изменений:

$$\frac{d\psi_A}{dt} - \frac{d\psi_B}{dt} = u_{AB} - R_1 \cdot i_A + R_1 \cdot i_B;$$

$$\frac{d\psi_B}{dt} - \frac{d\psi_C}{dt} = u_{BC} - R_1 \cdot i_B + R_1 \cdot i_C;$$

$$\frac{d\psi_C}{dt} - \frac{d\psi_A}{dt} = u_{CA} - R_1 \cdot i_C + R_1 \cdot i_A;$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} = u_a - R_2 \cdot i_a;$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} = u_b - R_2 \cdot i_b;$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} = u_c - R_2 \cdot i_c;$$

$$m = -L_{12} \cdot p_{\text{д}} \cdot \left\{ \begin{aligned} &+ i_A \left[ \sin(\varphi_{\text{эл}}) i_a + \sin\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_b + \sin\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_c \right] + \\ &+ i_B \left[ \sin\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_a + \sin(\varphi_{\text{эл}}) i_b + \sin\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_c \right] + \\ &+ i_C \left[ \sin\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_a + \sin\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_b + \sin(\varphi_{\text{эл}}) i_c \right] \end{aligned} \right\};$$

$$\frac{d\omega_{\text{эл}}}{dt} = \frac{p_{\text{д}}}{J} (m - m_{\text{с}});$$

$$\frac{d\varphi_{\text{эл}}}{dt} = \omega_{\text{эл}},$$

где  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, R_1, i_A, i_B, i_C, u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}$  – соответственно потокосцепления, активное сопротивление, токи и линейные напряжения статора;  $\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, R_2, i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, u_c$  – соответственно приведенные к статору потокосцепления, активное сопротивление, токи и напряжения ротора;  $\varphi_{\text{эл}}$  – угол поворота ротора в электрических радианах;  $\omega_{\text{эл}}$  – скорость вращения ротора в электрических рад/с;  $m$  – электромагнитный момент машины;  $p_{\text{д}}$  – число пар полюсов двигателя;  $J$  – момент инерции электродвигателя и механической части;  $m_{\text{с}}$  – момент сопротивления.

Потокосцепления выражаются:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_1 \cdot i_A - \frac{L_{12}}{2} i_B - \frac{L_{12}}{2} i_C + \\ &+ L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) i_a + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_b + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_c; \\ \Psi_B &= -\frac{L_{12}}{2} i_A + L_1 \cdot i_B - \frac{L_{12}}{2} i_C + \\ &+ L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_a + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) i_b + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_c; \\ \Psi_C &= -\frac{L_{12}}{2} i_A - \frac{L_{12}}{2} i_B + L_1 \cdot i_C + \\ &+ L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_a + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_b + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) i_c; \\ \Psi_a &= L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) i_A + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_B + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_C + \\ &+ L_2 \cdot i_a - \frac{L_{12}}{2} i_b - \frac{L_{12}}{2} i_c; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_b &= L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_A + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) i_B + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_C - \\ &\quad - \frac{L_{12}}{2} i_a + L_2 \cdot i_b - \frac{L_{12}}{2} i_c; \\ \psi_c &= L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_A + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) i_B + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) i_C - \\ &\quad - \frac{L_{12}}{2} i_a - \frac{L_{12}}{2} i_b + L_2 \cdot i_c,\end{aligned}$$

где  $L_{12}$  – взаимная индуктивность между обмотками фаз статора и ротора;  $L_1$  – собственная индуктивность обмотки фазы статора;  $L_2$  – приведенная к статору собственная индуктивность обмотки фазы ротора.

После дифференцирования выражений для потокосцеплений фаз  $A$  статора и  $a$  ротора получим:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_A}{dt} &= L_1 \frac{di_A}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_C}{dt} + \\ &\quad + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) \frac{di_a}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{эл}}) \omega_{\text{эл}} \cdot i_a + \\ &\quad + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_b}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_b + \\ &\quad + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_c; \\ \frac{d\psi_a}{dt} &= L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) \frac{di_A}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{эл}}) \omega_{\text{эл}} \cdot i_A + \\ &\quad + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_B}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_B + \\ &\quad + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_C}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_C + \\ &\quad + L_2 \cdot \frac{di_a}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_c}{dt}.\end{aligned}$$

Для остальных фаз аналогичные действия.

Подставим производные потокосцеплений в уравнения электрического равновесия. Для фазы  $A$  статора:

$$\begin{aligned}L_1 \frac{di_A}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_C}{dt} + \\ + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) \frac{di_a}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{эл}}) \omega_{\text{эл}} \cdot i_a + \\ + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_b}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_b + \\ + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_c +\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{L_{12}}{2} \frac{di_A}{dt} - L_1 \cdot \frac{di_B}{dt} + \frac{L_{12}}{2} \frac{di_C}{dt} - \\
 & - L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_a}{dt} + L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{эл} \cdot i_a - \\
 & - L_{12} \cdot \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_b}{dt} + L_{12} \cdot \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} \cdot i_b - \\
 & - L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} + L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{эл} \cdot i_c = u_{AB} - R_1 \cdot i_A + R_1 \cdot i_B;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) \frac{di_A}{dt} - \left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) \frac{di_B}{dt} + \\
 & + L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{\pi}{6}\right) \frac{di_a}{dt} + L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_b}{dt} + \\
 & + L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} = \\
 & = u_{AB} - R_1 \cdot i_A + R_1 \cdot i_B + \\
 & + L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{\pi}{6}\right) \omega_{эл} \cdot i_a + L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{эл} \cdot i_b + \\
 & + L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{эл} \cdot i_c.
 \end{aligned}$$

Для остальных статорных уравнений – аналогично.

Для уравнения фазы *a* ротора после преобразований получим:

$$\begin{aligned}
 & L_{12} \cdot \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_A}{dt} + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_B}{dt} + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \frac{di_C}{dt} + \\
 & + L_2 \frac{di_a}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_c}{dt} = u_a - R_2 \cdot i_a + \\
 & + L_{12} \cdot \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} \cdot i_A + L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{эл} \cdot i_B + L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \omega_{эл} \cdot i_C.
 \end{aligned}$$

По аналогии выражаем оставшиеся роторные уравнения.

В результате получим в матричной форме:

$$\frac{dI}{dt} = A^{-1} \cdot B; \quad B = U + C \cdot I; \quad m = -L_{12} \cdot p_d \cdot I_1 \cdot (D \cdot I_2),$$

где матрицы коэффициентов определяются следующим образом:

$$A = \begin{bmatrix} \left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) & -\left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) & 0 & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ 0 & \left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) & -\left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ -\left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) & 0 & \left(L_1 + \frac{L_{12}}{2}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \times \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6}\right) \\ L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_2 & -\frac{L_{12}}{2} & -\frac{L_{12}}{2} \\ L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & -\frac{L_{12}}{2} & L_2 & -\frac{L_{12}}{2} \\ L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & -\frac{L_{12}}{2} & -\frac{L_{12}}{2} & L_2 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -R_1 & R_1 & 0 & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ 0 & -R_1 & R_1 & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ R_1 & 0 & -R_1 & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{\pi}{6}\right) \\ L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & -R_2 & 0 & 0 \\ L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & 0 & -R_2 & 0 \\ L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_{12} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \times \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & 0 & 0 & -R_2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) & \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \end{bmatrix}$$

### Апробация модели

Полученная модель асинхронного электродвигателя была использована в модели асинхронного электропривода с прямым управлением моментом (*DTC*). Модель двигателя представлена на рис. 1. На рис. 2 представлены диаграммы изменения электромагнитного момента и угловой скорости вращения в течение переходных процессов «в малом» и «в большом» по управлению и возмущению моменту сопротивления. Следует отметить, что была учтена дискретизация системы по времени.

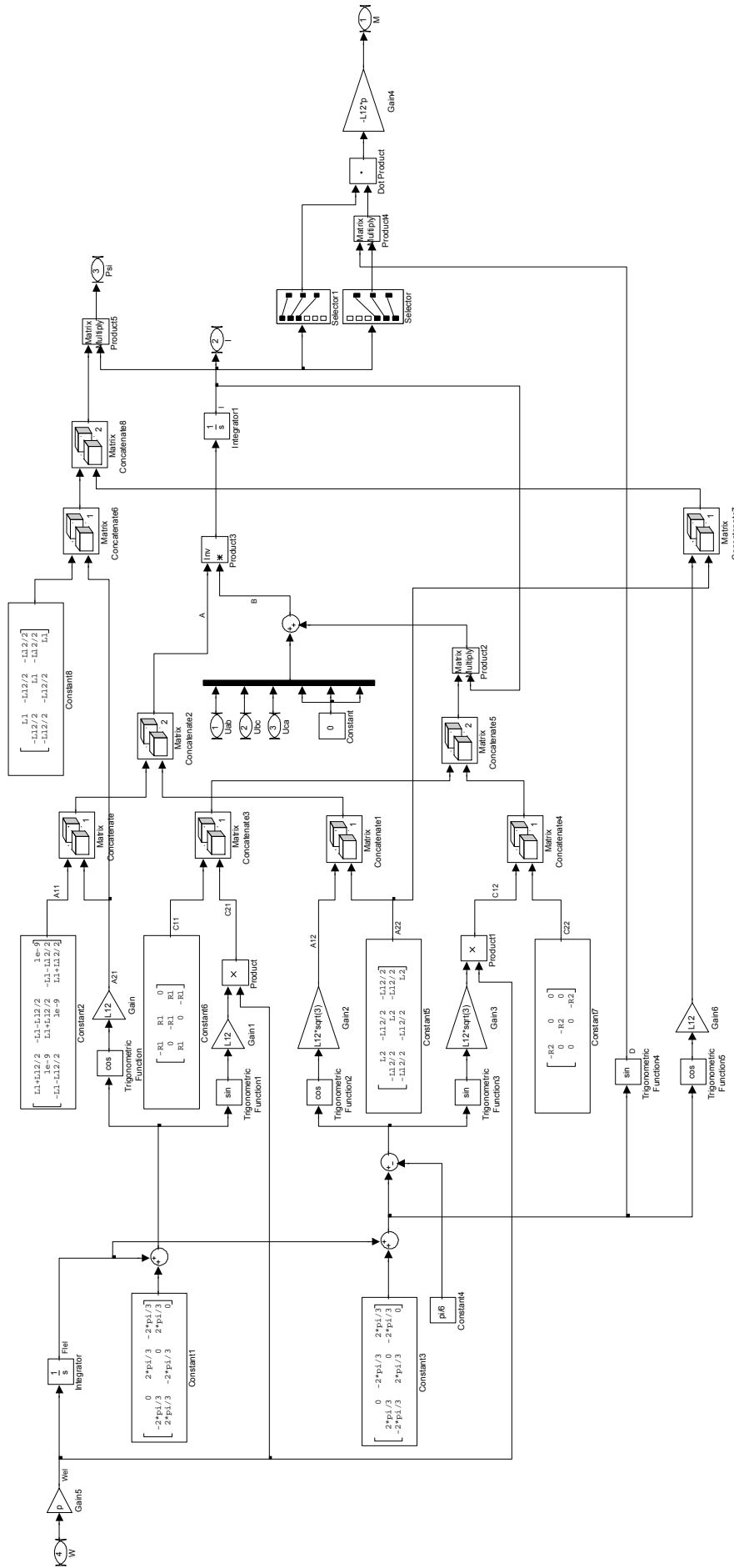


Рис. 1. Модель асинхронного электродвигателя в среде Matlab Simulink



Рис. 2. Диаграммы момента и скорости



### **Заключение**

В процессе апробации модели двигателя были выявлены следующие особенности:

1. Шаг расчета для получения адекватного результата должен иметь порядок единиц микросекунд. Очевидно, данная особенность обусловлена тем, что при дифференцировании выражений потокосцеплений во избежание чрезмерного усложнения модели не учитывалось, что скорость вращения является функцией времени. И для получения адекватного результата частота, соответствующая шагу расчета, должна быть достаточно велика по сравнению с частотой вращения двигателя.

2. В верхней левой четверти матрицы  $A$  при расчетах необходимо вместо нулей ставить достаточно малое конечное значение. Это связано с попарным вычитанием уравнений статора для получения в уравнениях линейных напряжений, что привело к вырождению матрицы  $A$ .

### **Литература**

1. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие для вузов / Б. И. Фираго, Л. Б. Палявчик. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.

*Получено 29.03.2011 г.*

УДК 621.311

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

**А. Н. ГУМИНСКИЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

В условиях постоянного увеличения цен на топливно-энергетические ресурсы остро стоит проблема энергосбережения, затрагивающая все отрасли народного хозяйства страны. Актуальна данная проблема и для энергетики. Повышение энергетической эффективности является приоритетной государственной политикой на всех уровнях систем электроснабжения: от выработки, преобразования и распределения, до потребления электроэнергии потребителями.

Выбор числа и мощности трансформаторов на подстанциях определяется величиной и характером электрических нагрузок (требуемой надежностью электроснабжения и характером потребления электроэнергии), территориальным размещением нагрузок, их перспективным изменением и при необходимости обосновывается технико-экономическими расчетами.

Проектирование большинства понижающих подстанций в СССР велось с учетом перспективного увеличения электрических нагрузок. Мощности понижающих трансформаторов выбирались на ступень выше оптимальной стандартной мощности, найденной по технико-экономическим показателям.

В настоящее время анализ графиков нагрузок многих понизительных подстанций энергосистемы и промышленных предприятий показывает, что трансформаторы подстанций работают в недогруженном режиме. Положение усугубилось после перехода от плановой экономики к рыночной, когда произошло снижение производства продукции на многих промышленных предприятиях, следовательно, произошло и снижение электрических нагрузок. Графики нагрузок многих предприятий потеряли стабильность и стали иметь ярко выраженную нелинейность как в суточном временном промежутке, так и в более продолжительных промежутках времени. В условиях рыночной экономики аналитически прогнозировать графики электрических нагрузок на длительную перспективу достаточно трудоемко и часто недостоверно.

На понизительных подстанциях, а также на станциях для трансформаторов связи с системой нагрузка трансформаторов определяется в основном графиком работы потребителей. Потери электроэнергии в трансформаторах, как известно, делятся на две составляющие: потери холостого хода и нагрузочные потери. В дневное время, когда загрузка трансформаторов велика, нагрузочные потери превышают потери холостого хода. В ночное время, в выходные и праздничные дни, когда загрузка трансформаторов снижается, потери холостого хода, напротив, намного превосходят нагрузочные. Поэтому, руководствуясь известным графиком нагрузки, необходимо выбирать то или иное число параллельно работающих трансформаторов для обеспечения их наиболее экономичной работы.

### Оптимизация режимов работы трансформаторов

Установившийся типовой график нагрузки позволяет рассчитать допустимую перегрузку трансформатора (величину и длительность), если в этом возникает необходимость по условиям эксплуатации.

Перегрузки трансформатора могут быть допущены, если они не сокращают в значительной степени срок службы изоляции, а следовательно, и трансформатора. Поэтому, исходя из допустимого износа изоляции от нагрева, составлены диаграммы нагрузочной способности трансформаторов. По этим диаграммам, зная коэффициент нагрузки  $k_n$ , можно определить допустимую длительность той или иной величины перегрузки или величину перегрузки при ее заданной длительности.

Для правильного выбора номинальной мощности трансформатора (автотрансформатора) необходимо располагать суточным графиком, отражающим как максимальную, так и среднесуточную активную нагрузку данной подстанции, а также продолжительность максимума нагрузки [1, с. 14]. При отсутствии суточного графика для практических целей определяется расчетный уровень максимальной активной нагрузки подстанции  $P_{\max}$  (МВт).

Если при выборе номинальной мощности трансформатора на однотрансформаторной подстанции исходить из условия

$$S_{\text{ном}} \geq \sum P_{\max} \geq P_p, \quad (1)$$

где  $\sum P_{\max}$  – максимальная активная мощность на пятом году эксплуатации – сроке, в условиях рыночной экономики согласованном с инвестором;  $P_p$  – проектная расчетная мощность подстанции, то при графике работы с кратковременным пиком нагрузки (0,5–1,0 ч) трансформатор будет длительное время недогружен. При этом неизбежно завышение номинальной мощности трансформатора и, следовательно, завышение установленной мощности подстанции. В ряде случаев выгоднее выбирать номинальную мощность трансформатора, близкую к максимальной нагрузке достаточной продолжительности [1, с. 15].

Наиболее экономичной работа трансформатора по ежегодным издержкам и потерям будет в случае, когда в часы максимума он будет работать с перегрузкой. В реальных же условиях значения допустимой нагрузки выбирают в соответствии с графиком нагрузки и коэффициентом начальной нагрузки, а также в зависимости от температуры окружающей среды, при которой работает трансформатор.

Номинальная мощность каждого трансформатора двухтрансформаторной подстанции, как правило, определяется аварийным режимом работы подстанции: при установке двух трансформаторов их мощность выбирается такой, чтобы при выходе из работы одного из них оставшийся в работе трансформатор с допустимой аварийной перегрузкой мог обеспечить нормальное электроснабжение потребителей.

Номинальная мощность трансформатора  $S_{\text{ном}}$  (МВ · А) на подстанции, с числом трансформаторов  $n > 1$ , в общем виде определяется из выражения

$$S_{\text{ном}} \geq \frac{P_p}{k_{\text{пер}} (n-1) \cos \varphi}, \quad (2)$$

где  $P_p = P_{\max} \cdot k_{\text{I-II}}$  – расчетная мощность, МВт;  $P_{\max}$  – суммарная активная максимальная мощность подстанции на пятом году эксплуатации, МВт;  $k_{\text{I-II}}$  – коэффициент участия в нагрузке потребителей I–II категорий;  $k_{\text{пер}}$  – коэффициент допустимой аварийной перегрузки;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки.

Для подстанций распределительных сетей, где в аварийном режиме до 25 % потребителей из числа малоответственных может быть отключено,  $k_{I-II}$  обычно принимается равным 0,75–0,85 (единице он равен, когда все потребители относятся к первой категории).

Так как  $k_{I-II} < 1$ , а  $k_{пер} > 1$ , то их отношение  $k = \frac{k_{I-II}}{k_{пер}}$  всегда меньше единицы, и

характеризует собой резервную мощность трансформатора, заложенную при выборе его номинальной мощности. Чем данное отношение меньше, тем меньше будет резерв установленной мощности трансформатора, и тем более эффективным будет использование трансформаторной мощности с учетом перегрузки.

Завышение коэффициента  $k$  приводит к завышению суммарной установленной мощности трансформаторов на подстанции. Уменьшение коэффициентов возможно лишь до такого значения, которое с учетом перегрузочной способности трансформатора и возможности отключения неответственных потребителей позволяет покрыть основную нагрузку одним оставшимся в работе трансформатором при аварийном выходе из строя второго.

Таким образом, установленная мощность трансформатора на подстанции

$$S_{тр} \geq \frac{k \cdot P_{max}}{\cos \varphi} . \quad (3)$$

Формально эта формула выглядит ошибочной. Действительно, единицы измерения активной мощности – Вт, а полной (кажущейся) – В · А. Есть различия и в физической интерпретации  $S$  и  $P$ . Но следует всегда полагать, что осуществляется компенсация реактивной мощности на шинах подстанции 10–0,4 кВт и что коэффициент мощности  $\cos \varphi$  находится на уровне 0,92–0,95. Такая ошибка, связанная с упрощением формул, не превосходит инженерную ошибку 10 %. Становится объяснимым формула (1), где активная и полная мощность не различаются.

На подстанциях могут устанавливаться несколько трансформаторов, работающих параллельно, причем номинальные мощности параллельно работающих трансформаторов могут отличаться. Для анализа экономичных режимов работы двухтрансформаторной подстанции (рис. 1) необходимо рассмотреть варианты с установкой на подстанции трансформаторов с одинаковой и разной номинальной мощностью.

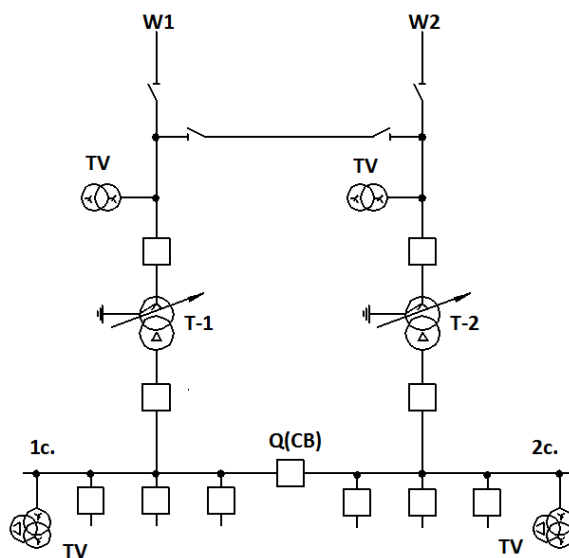


Рис. 1. Однолинейная схема двухтрансформаторной подстанции

На двухтрансформаторной подстанции установлены трансформаторы одинаковой номинальной мощности. На рис. 2 показаны зависимости потерь активной мощности в одном  $\Delta P_1$  и двух  $\Delta P_2$  параллельно работающих трансформаторах от нагрузки потребителей  $S_{нагр}$ . Точка пересечения графиков соответствует значению граничной мощности нагрузки  $S_{гр}$ , при которой потери мощности в одном трансформаторе равны потерям мощности в двух трансформаторах. Следовательно, значение данной мощности и определяет точку наиболее выгодного с точки зрения потерь мощности перехода от режима работы одним трансформатором к режиму работы двумя трансформаторами, и наоборот.

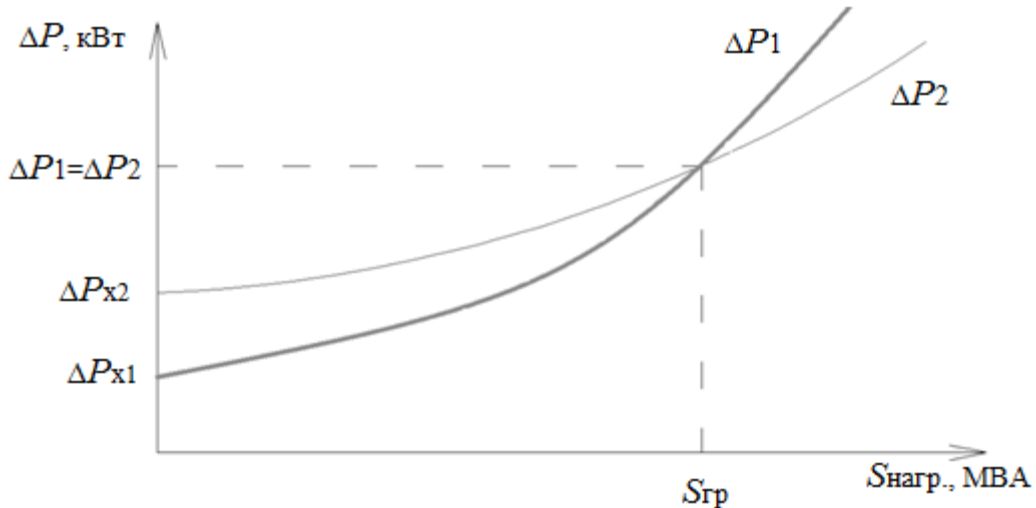


Рис. 2. Графики потерь активной мощности в трансформаторах одинаковой номинальной мощности

Потери мощности в одном и двух параллельно работающих трансформаторах соответственно:

$$\Delta P_1 = \Delta P'_x + \Delta P'_k \left( \frac{S}{S_{ном}} \right)^2; \tag{4}$$

$$\Delta P_2 = 2 \left( \Delta P'_x + \Delta P'_k \left( \frac{S}{2S_{ном}} \right)^2 \right), \tag{5}$$

где  $S$  – значение мощности нагрузки, МВ · А;  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора, МВ · А;  $\Delta P'_x, \Delta P'_k$  – приведенные потери холостого хода и короткого замыкания, кВт.

Приведенные потери учитывают потери активной мощности как в самом трансформаторе, так и создаваемые им в элементах питающей системы электроснабжения в зависимости от потребляемой трансформатором реактивной мощности:

$$\Delta P'_x = \Delta P_x + k_3 \cdot S_{ном} \frac{I_x \%}{100}, \text{ кВт}; \tag{6}$$

$$\Delta P'_k = \Delta P_k + k_3 \cdot S_{ном} \frac{u_k \%}{100}, \text{ кВт}, \tag{7}$$

где  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$  – потери мощности холостого хода и короткого замыкания трансформатора соответственно (каталожные данные), кВт;  $I_x\%$  – ток холостого хода трансформатора;  $u_k\%$  – напряжение короткого замыкания трансформатора;  $k_3$  – коэффициент удельного прироста потерь активной мощности, зависит от места размещения источника реактивной мощности, покрывающее потребление ее трансформатором. В первом приближении можно принимать  $k_3$  для трансформаторов, установленных на электростанциях, равным  $0,015 \text{ кВт/кВ} \cdot \text{А}$ , и для трансформаторов понижающих подстанций –  $0,04 \text{ кВт/кВ} \cdot \text{А}$  [2].

Приравняв значения потерь мощности в одном и двух трансформаторах, определяется значение граничной мощности:

$$\Delta P'_x + \Delta P'_k \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 = 2 \left( \Delta P'_x + \Delta P'_k \left( \frac{S}{2 \cdot S_{\text{НОМ}}} \right)^2 \right); \quad (8)$$

$$S_{\text{ГР}} = S_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P'_x}{\Delta P'_k}}, \text{ МВ} \cdot \text{А}. \quad (9)$$

Следовательно, экономичный режим работы двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами одинаковой мощности определяется минимальными потерями в трансформаторах на всем диапазоне нагрузок. Потери мощности описываются кривой  $\Delta P_{x1} - S_{\text{ГР}} - \Delta P_2$  на графике рис. 2.

**На двухтрансформаторной подстанции установлены трансформаторы разной номинальной мощности.** Условно примем, что номинальная мощность первого трансформатора Т1 меньше мощности второго Т2.

На рис. 3 показаны зависимости потерь активной мощности в трансформаторе меньшей номинальной мощности  $\Delta P_1$ , большей номинальной мощности  $\Delta P_2$  и суммарные потери в двух трансформаторах  $\Delta P_{\Sigma}$  от нагрузки потребителей  $S_{\text{нагр}}$ . Точка пересечения графиков  $S_{\text{ГР1}}$  соответствует значению граничной мощности нагрузки, при которой потери мощности в Т1 равны потерям мощности в Т2. Точка пересечения графиков  $S_{\text{ГР2}}$  соответствует значению граничной мощности нагрузки, при которой потери мощности в Т2 равны суммарным потерям мощности в Т1 и Т2. Следовательно, значение граничной мощности  $S_{\text{ГР1}}$  определяет точку наиболее выгодного с точки зрения потерь мощности перехода от режима работы трансформатором меньшей мощности к трансформатору большей мощности, и наоборот. Значение граничной мощности  $S_{\text{ГР2}}$  определяет точку наиболее выгодного перехода от режима работы трансформатором большей мощности к работе двумя параллельно включенными трансформаторами, и наоборот.

Значение граничной мощности  $S_{\text{ГР3}}$  не имеет качественной оценки для определения экономичных режимов работы двухтрансформаторной подстанции, значение мощности находится выше кривой минимальных потерь. Мощность  $S_{\text{ГР3}}$  определяет точку наиболее выгодного перехода от режима работы двумя трансформаторами к работе одним трансформатором меньшей мощности, и наоборот.

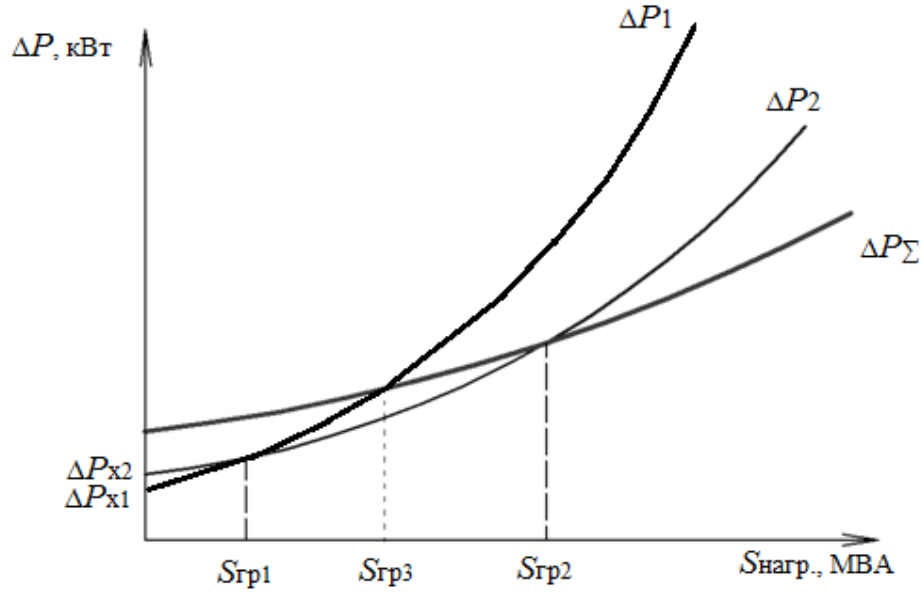


Рис. 3. График потерь активной мощности в трансформаторах различной номинальной мощности

Потери мощности в трансформаторе меньшей номинальной мощности

$$\Delta P_1 = \Delta P'_{x1} + \Delta P'_{k1} \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ1}}} \right)^2. \quad (10)$$

Потери мощности в трансформаторе большей номинальной мощности

$$\Delta P_2 = \Delta P'_{x2} + \Delta P'_{k2} \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ2}}} \right)^2. \quad (11)$$

При параллельной работе трансформаторов минимум потерь мощности соответствует распределению нагрузки пропорционально установленной мощности трансформаторов

$$\frac{S_1}{S_{\text{НОМ1}}} = \frac{S_2}{S_{\text{НОМ2}}}, \quad (12)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – мощность нагрузки первого и второго трансформаторов соответственно.

Суммарная мощность потерь при работе двух трансформаторов

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2} + \Delta P'_{k1} \left( \frac{S_1}{S_{\text{НОМ1}}} \right)^2 + \Delta P'_{k2} \left( \frac{S_2}{S_{\text{НОМ2}}} \right)^2. \quad (13)$$

Значения граничных мощностей нагрузки:

$$S_{\text{ГР1}} = \sqrt{\frac{S_{\text{НОМ1}}^2 \cdot S_{\text{НОМ2}}^2 (\Delta P'_{x2} - \Delta P'_{x1})}{S_{\text{НОМ2}}^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ1}}^2 \cdot \Delta P'_{k2}}}; \quad (14)$$

$$S_{\text{ГР2}} = \left( 1 + \frac{S_{\text{НОМ1}}}{S_{\text{НОМ2}}} \right) \sqrt{\frac{\Delta P'_{x1} \cdot S_{\text{НОМ2}}^4}{\Delta P'_{k2} (S_{\text{НОМ1}} + S_{\text{НОМ2}})^2 - (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2}) S_{\text{НОМ2}}^2}}; \quad (15)$$

$$S_{гр3} = \left(1 + \frac{S_{ном1}}{S_{ном2}}\right) \sqrt{\frac{\Delta P'_{к2} \cdot S_{ном1}^2 \cdot S_{ном2}^2}{\Delta P'_{к1} (S_{ном1} + S_{ном2})^2 - (\Delta P'_{к1} + \Delta P'_{к2}) S_{ном1}^2}}. \quad (16)$$

Экономичный режим работы двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами разной номинальной мощности определяется минимальными потерями в трансформаторах на всем диапазоне нагрузок. Потери мощности описываются кривой минимальных потерь  $\Delta P_{x1} - S_{гр1} - S_{гр2} - \Delta P_{\Sigma}$  на графике (рис. 3).

### Способы решения проблемы

Поскольку нагрузка большинства подстанций в течении суток и в разные дни недели не остается постоянной, а может изменяться в достаточно широком диапазоне, непрерывная работа со всеми включенными трансформаторами экономически нецелесообразна. Во время длительного снижения суммарной нагрузки подстанции один из трансформаторов выгодно держать отключенным, а всю нагрузку (обе секции шин низкого напряжения) запитать включением секционного выключателя от одного трансформатора (рис. 1). При этом может появиться необходимость гарантированного быстрого включения трансформатора, выведенного в резерв, при увеличении нагрузки подстанции до значения, при котором выгодно работать всеми трансформаторами подстанции. При этом должен быть введен в работу второй трансформатор, а секционный выключатель отключен.

Допускается параллельная работа трансформаторов (без отключения секционного выключателя стороны НН) при соблюдении следующих условий: группы соединения обмоток одинаковы, соотношение мощностей трансформаторов не более 1 : 3, коэффициенты трансформации отличаются не более чем на  $\pm 0,5\%$ , напряжения короткого замыкания отличаются не более чем на  $\pm 10\%$ , произведена фазировка трансформаторов. Также в данном режиме необходимо учитывать фактор увеличения токов короткого замыкания, оборудование должно быть устойчиво к их воздействию.

Для выравнивания нагрузки между параллельно работающими трансформаторами с отличными напряжениями короткого замыкания допускается в небольших пределах изменение коэффициента трансформации путем переключения ответвлений при условии, что ни один из трансформаторов не будет перегружен. Как правило, на параллельную работу должны включаться одинаковые трансформаторы (с точностью до производственных отклонений).

Технический аспект перехода от одного режима работы к другому может рассматриваться исходя из двух позиций: ручного перехода и автоматического.

Ручной переход применим в крайне редких случаях, как правило, на двухтрансформаторных подстанциях, не имеющих потребителей первой категории и имеющих стабильный график нагрузки, значение мощности которого в любом режиме не превысит допустимую мощность перегрузки трансформатора (по значению величины и продолжительности). Анализ систем электроснабжения показывает, что по данному пункту выбраны резервы по оптимизации режима работы: практически на всех подстанциях данного типа в работе находится один трансформатор, второй выведен в резерв.

На подстанциях, имеющих потребителей первой категории и с вероятностью увеличения мощности подстанции выше перегрузочной способности одного трансформатора, ручной вывод трансформатора в резерв недопустим. На данных типах подстанций необходим автоматический переход от режима работы одним трансформатором к режиму работы двумя, и наоборот.



Автоматический переход подразумевает наличие на подстанции аппаратных средств для управления режимом работы в зависимости от графика электрической нагрузки.

### **Заключение**

Оптимизация режимов работы двухтрансформаторных подстанций раскрывает весомый потенциал эффективного энергосбережения – сокращения потерь электроэнергии в системах электроснабжения. Например, для двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами ТДН-10000/110 годовая экономия электроэнергии, применяя концепцию повышения эффективности режимов работы, может достигать значения 140000 кВт · ч, а с трансформаторами ТРДН-40000/110 – уже 405000 кВт · ч.

Не изменяя тип оборудования подстанций и мощность подключенных потребителей, оперируя лишь составом включенного оборудования, можно изменять потери электроэнергии. Таким образом, определяющим фактором в эффективности работы двухтрансформаторной подстанции будет являться симбиоз графика электрической нагрузки потребителей и соответствующего состава включенного оборудования. Значения граничных мощностей позволяют определить нагрузку потребителя, при которой с точки зрения потерь мощности в трансформаторе эффективно переходить от одного режима работы к другому.

Поэтому актуальной является разработка адаптивных систем распределения нагрузки между трансформаторами с целью уменьшения потерь мощности как в самих трансформаторах, так и в питающих системах электроснабжения. Внедрение данных систем на подстанциях энергосистемы, промышленных предприятий, железнодорожного транспорта, сельского хозяйства позволит сократить потери мощности, что значительно повысит показатели выполнения Республиканской программы «Энергосбережение» в рамках конкретного предприятия и всей страны.

### **Литература**

1. Быстрицкий, Г. Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. – М. : Техн. лит., 2003. – 176 с.
2. Цирель, Я. А. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях / Я. А. Цирель, В. С. Поляков. – Л. : Энергоатомиздат, 1985.
3. Пекелис, В. Г. Эффективное энергосбережение посредством режимного отключения незагруженных трансформаторов / В. Г. Пекелис, Е. В. Боровский // Энергия и менеджмент. – 2007. – № 5.
4. СТП 09110.35.125–09. Методические рекомендации по выбору установок устройства включения резервного трансформатора. – Минск : НИиПИ РУП «Бел-энергосетьпроект».
5. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М. : Энергоатомиздат, 1989.

*Получено 11.03.2011 г.*

УДК 338.532.4.025.24:674.5

## ФАКТОРЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕНОВЫХ СОГЛАШЕНИЙ НА РЫНКЕ

**И. В. ИВАНОВСКАЯ**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
экономический университет», г. Минск*

**Н. П. ДРАГУН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Ценовое взаимодействие производителей на олигополистическом рынке имеет две основных формы проявления:

– некооперативное установление цен, базирующееся на концепции предположительных вариаций – ценообразование, основанное на предположениях о том, как представляет каждая фирма свою зависимость от других фирм. Эта форма ценового взаимодействия детально исследована в ставших классикой экономической мысли работах Cournot A., Stackelberg H., Bertrand J., Edgeworth F., Chamberlin E., Iwata G., Gollor F., Roberts M. и др.;

– согласованное установление цен – действия нескольких фирм на олигополистическом рынке, имитирующие поведение единственной доминирующей фирмы, ограничивающие взаимную конкуренцию и позволяющие участникам соглашения извлекать монопольную прибыль, защищать рынок от конкуренции со стороны потенциальных участников и др. [11], [17], [18]. Такая деятельность может принимать различные формы – явный сговор (*explicit collusion*, соглашения), молчаливый сговор (*tacit collusion*, согласованные действия), и в большинстве случаев является противозаконной. Многообразие механизмов реализации сговора существенно усложняет процедуру его выявления.

В Республике Беларусь работа по выявлению и пресечению антиконкурентных ценовых соглашений (согласованных действий) субъектов хозяйствования осуществляется на основе «Инструкции по выявлению и пресечению антиконкурентных соглашений (согласованных действий) о ценах» [1]. В Инструкции дана характеристика этапов анализа, направленного на выявление ценовых соглашений, факторов (характеристики товара, специфика их производства, особенности рынков сбыта и т. д.) и фактов (проявления ценовых соглашений), указывающих на наличие сговора производителей. В то же время в указанном нормативном документе отсутствует описание ряда значимых аспектов сговора и формализация действий по его выявлению. Также в расширении и уточнении нуждается перечень факторов, способствующих возникновению и устойчивости сговора, а сами факторы, равно как и доказательства ценовых соглашений (например, параллелизм действий), – в методиках количественной оценки, базирующихся на научно обоснованных моделях сговора. Настоящая работа направлена на решение указанной проблемы.

Цель исследования – определить факторы, способствующие возникновению и устойчивости сговора, а также направления и условия проявления их влияния.

В соответствии с указанной целью поставлены и решены следующие задачи:

- исследовать экономическую сущность сговора;
- определить факторы, способствующие возникновению сговора, и на основе моделирования установить направление их влияния на его устойчивость;
- апробировать предложенные теоретические модели сговора на примере рынка фанеры Беларуси для определения вероятности возникновения ценовых соглашений производителей на указанном рынке.

#### **Методика исследования и исходные данные**

Для достижения поставленной цели нами применялись следующие методы исследования: монографический, моделирования, тестирования гипотез. В качестве информационной базы использовались работы зарубежных авторов, посвященные анализу структуры рынка, устойчивости и продолжительности сговора, ценообразованию на олигополистических рынках. В качестве исходных данных для количественного анализа использована финансовая отчетность предприятий-производителей фанеры Беларуси и данные Национального статистического комитета. Период наблюдений – 2006–2010 гг.

#### **Теоретические основы определения вероятности возникновения и анализа устойчивости ценовых соглашений**

Анализ ценовых соглашений олигополистов основывается на теории игр, согласно которой если рыночная ситуация повторяется для бесконечной серии периодов, то возможно, что в отрасли установится монопольная цена. Причина, по которой каждая фирма-участник сговора не будет отклоняться от общей стратегии монопольного ценообразования – будущие потери, которые последуют, когда конкуренты предпримут ответные меры (как правило, это ценовая война) против нарушившего условия сговора олигополиста (Friedman J. [11]).

Поскольку наказание за отклонение происходит в будущем периоде, а выигрыш от него олигополист извлекает в текущем, вероятность возникновения и устойчивости сговора зависит, таким образом, от отношения величины краткосрочной прибыли к долгосрочной, и, следовательно, от фактора дисконтирования (Friedman J. показал, что сговор будет тем устойчивее, чем выше фактор дисконтирования для его участников [11]). При этом устойчивость сговора оценивается не величиной фактора

дисконтирования ( $\delta = \frac{1}{1+r}$ , где  $r$  – ставка процента, коэф.), а его соотношением с пороговым значением ( $\delta^*$ ), которое суммирует релевантные характеристики отрасли, влияющие на устойчивость сговора (если  $\delta \geq \delta^*$ , сговор будет устойчив при любой цене) (Ivaldi M. и др. [17, с. 8]).

Таким образом, чтобы определить направление влияния отраслевых характеристик (факторов) на вероятность возникновения и устойчивость сговора, необходимо исследовать влияние этих характеристик на  $\delta^*$ : способствующие сговору факторы будут снижать величину  $\delta^*$ , дестабилизирующие сговор – повышать.

#### **Релевантные факторы ценовых соглашений**

Нами установлено, что рассматриваемые в литературе факторы сговора можно классифицировать следующим образом: (i) структурные факторы (количество конкурентов, распределение их рыночных долей, барьеры входа, частота взаимодействия олигополистов и корректировки ими цен, прозрачность и инновационность рынка); (ii) характеристики внутренней организации объединения (симметричность участников ценового соглашения по издержкам и производственным мощностям, дифференцированность продукции, контакты на нескольких рынках); (iii) экзоген-

ные макроэкономические условия (уровень процентной ставки, колебания спроса, цикличность экономики). Рассмотрим каждый из этих факторов отдельно.

*Количество участников ценового соглашения.* Зависимость вероятности возникновения и устойчивости сговора от количества его участников исследовалась в работах Ivaldi M., Cabral L., Levenstein M., Suslow V., Brock W., Scheikman J. [6], [7], [17], [20]. Основная гипотеза – сговор проще сохранить при небольшом количестве участников. Это связано с ростом транзакционных издержек создания и поддержания сговора; снижением доли каждого олигополиста в монопольной прибыли и их потерь от последующей за отклонением ценовой войны.

Предположим, что на рынке  $n$  фирм играют в повторяющуюся игру Бертрана бесконечное количество периодов. Их предельные издержки ( $c$ ) одинаковы, и ограничения на производственные мощности отсутствуют (следовательно, фирма, которая первой незначительно снижает цену, удовлетворяет весь спрос и получает монопольную прибыль). В первом периоде фирмы устанавливают монопольную цену  $p^c > c$  и делят монопольную прибыль поровну  $\frac{\pi^c}{n}$  (т. е. вступают в сговор). В каждом последующем периоде прежде, чем установить свои цены, фирмы изучают их прошлое поведение. Если все фирмы придерживались общей стратегии ценообразования, то каждая из них установит цену  $p^c > c$ . Тогда прибыль каждого участника сговора составит (1):

$$\frac{\pi^c}{n} + \delta \frac{\pi^c}{n} + \delta^2 \frac{\pi^c}{n} + \dots = \frac{\pi^c}{n} (1 + \delta + \delta^2 + \dots) = \frac{\pi^c}{n} \frac{1}{1 - \delta}. \quad (1)$$

Если один из участников снизил свою цену в предыдущем периоде (нарушил соглашение и получил таким образом всю монопольную прибыль), в текущем периоде это становится известно его конкурентам, цена устанавливается на уровне предельных издержек и начинается ценовая война. Сговор будет устойчив, если долгосрочная прибыль от участия в нем будет превышать краткосрочную выгоду от его нарушения (2):

$$\frac{\pi^c}{n} (1 + \delta + \delta^2 + \dots) \geq \pi^c + \delta \times 0 \quad \text{или} \quad \delta \geq \delta^*(n) \equiv 1 - \frac{1}{n}. \quad (2)$$

Таким образом, по мере роста количества участников сговора ( $n$ ) пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(n)$  увеличивается<sup>1</sup>. Следовательно, рост исследуемого фактора дестабилизирует сговор.

*Распределение долей рынка.* Влияние этого фактора рассматривалось в работах Ivaldi M., Cabral L., Mason C., Phillips O., Nowell C. и др. [7], [17], [21]. Основная гипотеза – когда фирмы взаимодействуют по Бертрону (предельные издержки равны, ограничения на производственные мощности отсутствуют), асимметричность рыночных долей снижает устойчивость сговора, так как фирма с наименьшей долей рынка имеет самый сильный стимул отклониться от общей стратегии ценообразования, а в последующей за отклонением ценовой войне ее потери будут меньше, чем у олигополистов, занимающих большие доли рынка.

Предположим, что на рынке  $n$  фирм играют по Бертрону, доля рынка наименьшей фирмы составляет  $s_1$ , а  $s_2 = 1 - s_1$  – сумма долей остальных олигополистов. Фирма с наименьшей долей рынка будет придерживаться сговора, если выполняется условие (3):

<sup>1</sup>Здесь и далее в выводах по моделям – при прочих равных условиях.

$$s_1 \pi^c (1 + \delta + \delta^2 + \dots) \geq \pi^c + \delta \times 0, \frac{s_1}{1 - \delta} \geq 1, \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(s_1) \equiv 1 - s_1. \quad (3)$$

Таким образом, чем больше асимметрия рыночных долей (меньше доля самой малой фирмы  $s_1$ ), тем выше пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(s)$  и, соответственно, тем сложнее обеспечить устойчивость сговора.

*Барьеры входа.* Влиянию этого фактора посвящены работы Schmalensee R., Spiller P., Harrington J. E., Stenbacka L. R. [15], [27]–[29]. Основная гипотеза – низкие барьеры входа дестабилизируют сговор. Это обусловлено уменьшением потерь от последующей за отклонением от сговора ценовой войны в случае появления новых участников.

Рассмотрим ситуацию, в которой дуополисты играют в игру Бертрана (предпосылки аналогичны модели (2)) и с некоторой вероятностью  $\mu$  новая фирма входит на рынок и устанавливает цену  $p = c$  (в том случае, если входящая фирма хочет подключиться к сговору, фактор дисконтирования описывается моделью зависимости от количества фирм на рынке (2)). Сговор устойчив, если выполняется условие (4):

$$\frac{\pi^c}{n} + (1 - \mu) \frac{\delta}{1 - \delta} \frac{\pi^c}{n} \geq \pi^c + \delta \times 0, \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(\mu) \equiv \frac{n - 1}{n - \mu}. \quad (4)$$

Пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(\mu)$  повышается по мере увеличения вероятности появления новой фирмы, желающей развязать ценовую войну, на рынке.

*Частота взаимодействия фирм.* Вопросы влияния частоты взаимодействия участников сговора и частоты ценовых корректировок затрагивались в работах Ivaldi M., Jullien B., Cabral L., Levenstein M., Suslow V. [7], [17], [20]. Основная гипотеза – частое взаимодействие и согласование цен облегчают сговор.

Предположим, что олигополисты играют в повторяющуюся игру Бертрана (предпосылки аналогичны модели (2)) и взаимодействуют в каждом периоде  $dt$  ( $1, dt, 2dt$  и т. д.), где  $d$  – длительность периода  $t$ . Более частое взаимодействие означает меньшую длительность «периодов ожидания» согласования действий  $d$ . Сговор жизнеспособен, если выполняется условие (5):

$$\frac{\pi^c}{n} (1 + \delta^{dt} + \delta^{2dt} + \dots) \geq \pi^c + \delta^{dt} \times 0, \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(d) \equiv \sqrt[d]{1 - \frac{1}{n}}. \quad (5)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(d)$  увеличивается по мере роста длительности  $d$  «периодов ожидания»: чем реже взаимодействуют фирмы, тем меньше воспринимаемая ценность будущего наказания и возможность обеспечить устойчивость сговора.

*Частота корректировки цен.* Тот же подход применяется и к моделированию влияния частоты ценовых корректировок на устойчивость сговора. Чем чаще корректируются цены, тем быстрее обнаружится отклонение от общей стратегии. Предположим, что фирмы фиксируют свои цены для каждого периода  $t$  с частотой  $f$ . Сговор устойчив, если выполняется условие (6):

$$\frac{\pi^c}{n} (1 + \delta^{\frac{t}{f}} + \delta^{\frac{2t}{f}} + \dots) \geq \pi^c (1 + \delta^{\frac{t}{f}} + \delta^{\frac{2t}{f}} + \dots + \delta^{\frac{it}{f}}) + \delta^{\frac{it+1}{f}} \times 0, \quad (6)$$

где правая сторона отражает тот факт, что нарушившая сговор фирма может извлечь выгоду от «обмана» своих конкурентов в течение  $i$  периодов, пока это нарушение не будет обнаружено. Тогда пороговое значение фактора дисконтирования составит (7):

$$\delta \geq \delta^*(f) \equiv \left(1 - \frac{1}{n}\right)^f. \quad (7)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(f)$  снижается по мере роста частоты корректировки цен  $f$ : чем чаще фирмы корректируют цены, тем более устойчивее сговор.

*Информационная прозрачность рынка.* Устойчивость сговора во многом определяется прозрачностью рынка, т. е. способностью фирм своевременно получить информацию о ценах (объемах производства) своих конкурентов. Эта проблема наблюдаемости была сначала поднята Stigler G. в работе [30] и проанализирована Green E., Porter R., Abreu D., Pearce D. и Stachetti E. в работах [3], [12]<sup>1</sup>. Они подчеркивали, что отсутствие ясности относительно цен и продаж конкурентов не обязательно предотвращает сговор полностью, но делает его менее устойчивым.

Рассмотрим игру олигополистов по Бертрону (предпосылки аналогичны модели (2)). Вероятность того, что нарушение сговора одним из участников будет обнаружено остальными составляет  $\varphi$ . Тогда сговор устойчив, если выполняется условие (8):

$$\frac{\pi^c}{n} \frac{\delta}{1-\delta} \geq (1-\varphi)\pi^c, \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(\varphi) \equiv 1 - \frac{1}{n(1-\varphi)}. \quad (8)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(\varphi)$  повышается по мере снижения прозрачности рынка (вероятности обнаружения нарушения сговора).

*Инновации.* Вероятность возникновения и устойчивости сговора на инновационных рынках исследовалась в работах Ivaldi M., Jullien B., Cabral L. [7], [17]. Основная гипотеза – сговор менее устойчив на инновационных рынках, поскольку инновации обеспечивают фирме существенные преимущества перед конкурентами, уменьшая одновременно и размер будущей прибыли от сговора, и величину наказания, которое конкуренты будут в состоянии осуществить.

Предположим, что олигополисты взаимодействуют по Бертрону (предпосылки аналогичны модели (2)) и с некоторой вероятностью  $\rho$  на рынке появляется продуктовая инновация<sup>2</sup>. Тогда вероятность того, что остальные участники рынка просуществуют еще один период, составляет  $(1-\rho)$ . В течение этого периода их ожидаемая дисконтированная прибыль составит (9):

$$V = \frac{\pi^c}{n} + (1-\rho)\delta \frac{\pi^c}{n} + (1-\rho)\delta^2 \frac{\pi^c}{n} + \dots = \frac{\pi^c}{n} + \frac{(1-\rho)\rho}{1-\delta} \frac{\pi^c}{n} \geq \pi^c, \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(\rho) = \frac{n-1}{n-\rho}. \quad (9)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(\rho)$  повышается по мере увеличения вероятности появления на рынке продуктовой инновации.

<sup>1</sup>Эта же проблема затрагивается в «Инструкции по выявлению и пресечению антиконкурентных соглашений (согласованных действий) о ценах» [7].

<sup>2</sup>Моделирование влияния на сговор технологических инноваций аналогично моделированию влияния несимметричности затрат.

*Симметричность производителей по затратам.* Нами установлено, что в литературе выделяется две основных причины, согласно которым асимметрия затрат рассматривается как дестабилизирующий сговор фактор:

– асимметричность затрат может исключить какие-либо «фокальные точки» в ценовой политике участников сговора и таким образом усложнить проблему координации (например, у Suslow V., Mason C., Nowell C., Lambson V., Rothschild R. и др. [16], [19]–[21]);

– «эффективную» фирму сложнее дисциплинировать, так как в случае нарушения сговора она выиграет больше, чем ее оппоненты, и меньше потеряет от последующего за отклонением наказания (например, у Abreu D., Miclos-Thal J., Vasconcelos H. [2], [22], [31]).

Рассмотрим взаимодействие  $n$  олигополистов по Бертрону (ограничения на производственные мощности отсутствуют, затраты асимметричны ( $c_H > c_L$ ), рыночные доли олигополистов равны, спрос неэластичный – фирмы могут продавать совокупный объем  $D$ , пока цена не превышает  $p^c$ ). Наименее эффективная фирма будет придерживаться сговора в том случае, если выполняется условие (10):

$$(p^c - c_H) \frac{D}{n} (1 + \delta + \dots) \geq (r - c_H) D \text{ или } \delta \geq \frac{1}{2}, \quad (10)$$

где  $c_H$  – удельные затраты наименее эффективной фирмы;  $c_L$  – удельные затраты наиболее эффективной фирмы.

Условие участия в сговоре наиболее эффективной фирмы имеет вид (11):

$$(p^c - c_L) \frac{D}{n} (1 + \delta + \dots) \geq (p^c - c_L) D + \delta (c_H - c_L) D (1 + \delta + \dots). \quad (11)$$

Условие (11) показывает, что в случае отклонения от сговора наиболее эффективная фирма потеряет меньше. В частности, она никогда не согласится разделить рынок на равные части с другими участниками сговора, если  $c_H - c_L > (p^c - c_L)/n$ , так как в данном случае ее выигрыш в условиях ценовой войны будет больше. Исходя из этого, сговор может иметь место, если выполняется условие  $n(c_H - c_L)/(p^c - c_L) < 1$ . Тогда пороговое значение фактора дисконтирования для эффективной фирмы определяется условием (12):

$$\delta \geq \delta^*(\gamma) = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \gamma, \text{ где } \gamma = \frac{p^c - c_L}{p^c - c_H}. \quad (12)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(\gamma)$  увеличивается по мере роста асимметрии, измеряемой  $\gamma$ . Следовательно, асимметрия затрат препятствует возникновению и устойчивости сговора.

Тем не менее в научной литературе встречаются работы, посвященные моделированию ситуаций, в которых асимметрия затрат не только не ослабляет сговор (например, Patinkin D. и Friedman J. показали, что картель, сталкивающийся с асимметрией затрат, всегда может перераспределить нормы выпуска его участников так, чтобы прибыль каждого была больше, чем в условиях конкуренции [11], [23]), но и при определенных условиях обеспечивает его устойчивость (у Bain J. и Miclos-Thal J. асимметрия затрат делает сговор устойчивым при наличии компенсационных платежей, которые позволяют фирмам увеличить отраслевую прибыль, направляя боль-

шую часть производства более эффективной фирме и не побуждая менее эффективную отклоняться от общей стратегии [5], [22]).

Таким образом, если не задействованы механизмы перераспределения долей рынка, отсутствуют компенсационные платежи, асимметричность затрат является дестабилизирующим сговор фактором.

*Симметричность производителей по производственным мощностям.* Анализ устойчивости сговора в условиях асимметричности производственных мощностей посвящены работы Lambson V., Mason C. F., Levenstein M., Suslow V., Davidson C., Deneckere R. (отмечают, что в эмпирических играх дуополии, сотрудничество более вероятно, когда игроки оказываются перед симметричными производственными возможностями [10], [19]–[21]), Compte O. (асимметрия мощностей делает сговор неустойчивым. В то же время, когда совокупная мощность ограничена, но при этом существенно превышает емкость рынка, асимметрия способствует устойчивости сговора [9]).

Рассмотрим игру олигополистов по Бертрану (предельные издержки фирм равны, введены ограничения на производственные мощности, спрос неэластичный – фирмы могут продавать совокупный объем  $D$ , пока цена не превышает  $p^c$ , и получать при данной цене в условиях сговора монопольную прибыль  $\pi^c$ ). В таком случае пороговое значение фактора дисконтирования будет определяться условием (13):

$$s_i \pi^c (1 + \delta + \delta^2 + \dots) \geq \frac{k_i}{D} \pi^c; \quad \delta \geq \delta^*(u) \equiv 1 - \frac{D_i}{k_i} = 1 - u_i, \quad (13)$$

где  $s_i$  – рыночная доля  $i$ -й фирмы, коэф.;  $k_i$  – производственные мощности  $i$ -й фирмы, ед.;  $D_i$  – объем реализации  $i$ -й фирмы, ед.;  $u_i$  – коэффициент использования производственных мощностей  $i$ -й фирмы, коэф.

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(u)$  повышается по мере снижения загрузки производственных мощностей фирм, что аналогично усилению асимметрии между их долей рынка и долей производственной мощности в совокупных мощностях отрасли. Следовательно, для повышения устойчивости сговора доли рынка должны распределяться пропорционально производственным мощностям участников. Условие устойчивости сговора в таком случае имеет вид (14):

$$\frac{k_i}{K} \pi^c (1 + \delta + \delta^2 + \dots) \geq \frac{k_i}{D} \pi^c; \quad \delta \geq \delta^*(ex_K) \equiv 1 - \frac{D}{K} = 1 - ex_K, \quad (14)$$

где  $K$  – совокупная производственная мощность отрасли, ед.;  $ex_K$  – коэффициент избыточности производственных мощностей отрасли, коэф.

Следовательно, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(ex_K)$  повышается по мере снижения избыточности производственных мощностей отрасли.

Таким образом, верификация гипотезы о влиянии асимметричности производственных мощностей на устойчивость сговора не позволяет сделать однозначный вывод о направлении такого влияния, т. е. в зависимости от условий рынка, способности фирм договориться о перераспределении объемов производства и долей рынка, асимметричность мощностей может как стабилизировать, так и дестабилизировать сговор.

*Дифференцированность товаров.* Анализ устойчивости сговора в условиях вертикальной дифференциации посвящены исследования Ivaldi M., Hackner J. [13], [17]. В их работах показано, что когда фирмы различаются по уровню качества,



сговор будет тем неустойчивее, чем выше конкурентные преимущества «качественной» фирмы<sup>1</sup>.

Для моделирования влияния вертикальной дифференциации на устойчивость сговора рассмотрим взаимодействие дуополистов по Бертранию (ограничения на производственные мощности отсутствуют, рыночные доли равны, спрос неэластичный – фирмы могут продавать совокупный объем  $D$ , пока цена не превышает  $p^c$  за менее качественный товар и  $p^c + b$  – за более качественный,  $c$  – удельные затраты производства товаров, условиями сговора предусматривается сохранение ценового дифференциала  $b$  между дуополистами, иначе весь спрос переходит к более качественному товару). Менее эффективная фирма будет придерживаться сговора в том случае, если выполняется условие (15):

$$(p^c - c) \frac{D}{2} (1 + \delta + \dots) \geq (p^c - c) D \text{ или } \delta \geq \frac{1}{2}. \quad (15)$$

Условие участия в сговоре эффективной фирмы имеет вид (16):

$$(p^c - c + b) \frac{D}{2} (1 + \delta + \dots) \geq (p^c - c + b) D + \delta \times b D (1 + \delta + \dots), \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(b) \equiv \frac{p^c - c + b}{2(p^c - c)}. \quad (16)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(b)$  увеличивается с ростом степени вертикальной дифференциации товара.

Проблемы устойчивости сговора в контексте горизонтальной дифференциации обсуждались в работах Davidson C., Deneckere R., Harrington Jr., Häckner J., Chang M., Ross T. [8], [10], [16], [24]. В целом влияние горизонтальной дифференциации является весьма неоднозначным и зависит от условий конкуренции, выбора стратегической переменной, симметричности местоположения фирм, транспортных расходов и др.

*Рост спроса.* Вероятность возникновения и устойчивости сговора в условиях роста спроса исследовалась в работах Ivaldi M., Jullien B., Cabral L. [7], [17]. Основная гипотеза исследований – рост спроса способствует устойчивости сговора.

Предположим, что олигополисты взаимодействуют по Бертранию (фирмы симметричны, предельные издержки равны, ограничения на производственные мощности отсутствуют). Темп прироста спроса в каждом периоде  $t$  равен  $g$  (спрос растет, когда  $g$  – положительная величина). Договариваясь о цене сговора  $p^c$ , каждая фирма получает в каждом периоде  $t$  прибыль  $(1 + g)^t \pi^c / n$ , где  $\pi^c = (p^c - c) D(p^c)$ ,  $D(p^c)$  – функция спроса. Сговор устойчив, когда для каждого его участника выполняется условие (17):

$$\frac{\pi^c}{n} + \delta(1 + g) \frac{\pi^c}{n} + \delta^2(1 + g)^2 \frac{\pi^c}{n} + \dots \geq \pi^c + \delta(1 + g) \times 0, \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(g) = \frac{n - 1}{n(1 + g)}. \quad (17)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(g)$  снижается по мере роста спроса.

*Деловые (экономические) циклы и колебания спроса.* Большинство ученых сходятся во мнении, что колебания и цикличность спроса отрицательно влияют на устойчивость сговора. Различие существующих подходов заключается в том, какую из

<sup>1</sup> Дифференциация продукта может быть связана с двумя обстоятельствами: различием потребительских характеристик товаров, удовлетворяющих разные вкусы (горизонтальная), и различием качества товаров, удовлетворяющих одинаковые вкусы (вертикальная).

фаз цикла (подъем или спад) считать наименее благоприятной для сговора. Проблема стабильности сговора в период спада затронута в работах Green E., Haltiwanger J., Harrington J. (показали, что сговор более неустойчив в периоды экономического спада, чем во время «бума» [12], [14]). Влияние цикличности спроса на устойчивость сговора в период подъема моделировалось в работах Rotemberg J., Bagwell K., Staiger R. (показали, что сговор наиболее неустойчив в период высокого спроса, когда стимул обмануть конкурента высокий [4], [25], [31]).

Предположим, что спрос носит случайный характер и с одинаковой вероятностью он либо снижается, либо растет, и тогда его темп роста составляет либо  $(1-\varepsilon)D(p)$ , либо  $(1+\varepsilon)D(p)$  соответственно (при этом ожидаемая монополия (со-вокупная) прибыль не зависит от неопределенности спроса, т. е.  $\pi^c = (p^c - c)D(p^c)$ ). В условиях сговора краткосрочная прибыль от отклонения выше, когда спрос высокий  $((1+\varepsilon)\pi^c/n$  – в фазе роста спроса,  $(1-\varepsilon)\pi^c/n$  – в фазе спада). Сговор устойчив, если выполняется условие (18):

$$\delta V = \frac{\delta}{1-\delta} \frac{\pi^c}{n} \geq (1+\varepsilon)\pi^c, \text{ т. е. } \delta \geq \delta^*(\varepsilon) = \frac{n + \varepsilon n}{1 + n + \varepsilon n}. \quad (18)$$

Таким образом, пороговое значение фактора дисконтирования  $\delta^*(\varepsilon)$  возрастает с ростом величины колебаний спроса  $\varepsilon$ .

Полученные нами формулы расчета пороговых значений и теоретически установленные направления влияния факторов, способствующих возникновению и устойчивости ценовых соглашений на рынке, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Пороговые значения факторов, способствующих возникновению и устойчивости ценовых соглашений на рынке**

Фактор	Направление влияния на устойчивость сговора	Пороговое значение $\delta^*$
Количество участников ценового соглашения, $n$	Негативное	$\delta \geq \delta^*(n) \equiv 1 - \frac{1}{n}$
Симметричность распределения долей рынка, $s$	Негативное	$\delta \geq \delta^*(s) \equiv 1 - s$
Высота барьеров входа, $\mu$	Позитивное	$\delta \geq \delta^*(\mu) \equiv \frac{n-1}{n-\mu}$
Длительность периодов согласования и корректировки цен, $d$	Негативное	$\delta \geq \delta^*(d) \equiv \sqrt[1-d]{1 - \frac{1}{n}}$
Частота корректировки цен, $f$	Позитивное	$\delta \geq \delta^*(f) \equiv \left(1 - \frac{1}{n}\right)^f$
Прозрачность рынка, $\varphi$	Позитивное	$\delta \geq \delta^*(\varphi) \equiv 1 - \frac{1}{n(1-\varphi)}$
Инновационность рынка (по продуктовым инновациям), $\rho$	Негативное	$\delta \geq \delta^*(\rho) = \frac{n-1}{n-\rho}$
Асимметричность производственных мощностей, $u$	Негативное (при отсутствии перераспределения долей рынка) / позитивное (в условиях перераспределения долей рынка)	$\delta \geq \delta^*(u) \equiv 1 - u_i$
Асимметричность по затратам, $\gamma$	Негативное	$\delta \geq \delta^*(\gamma) = \left(1 - \frac{1}{n}\right)\gamma$
Избыточность производственных мощностей отрасли, $ex_k$	Позитивное (в условиях перераспределения долей рынка)	$\delta \geq \delta^*(ex_k) \equiv 1 - ex_k$

Окончание табл. 1

Фактор	Направление влияния на устойчивость сговора	Пороговое значение $\delta^*$
Вертикальная дифференциация товара, $b$	Негативное	$\delta \geq \delta^*(b) = \frac{1}{2} \frac{p^c - c + b}{p^c - c}$
Рост спроса, $g$	Позитивное	$\delta \geq \delta^*(g) = \frac{n-1}{n(1+g)}$
Колебания спроса, $\varepsilon$	Негативное	$\delta \geq \delta^*(\varepsilon) = \frac{n + \varepsilon n}{1 + n + \varepsilon n}$

Примечание: разработано авторами.

### Факторы ценовых соглашений на рынке фанеры Беларуси

Полученные нами выше теоретические результаты апробированы на примере рынка фанеры Беларуси. На указанном рынке действуют шесть организаций-продавцов: ОАО «Борисовдрев», ОАО «Гомельдрев», ОАО «Мостовдрев», ЗАО «Пинскдрев», ОАО «Речицадрев», ОАО «ФанДОК», что обуславливает его олигополистическую структуру.

Проведенные нами тесты по установлению факта согласования цен на рассматриваемом рынке путем: (i) определения совпадения дат принятия ценовых решений на основе коэффициента конкордации  $W$  Кендалла; (ii) оценки равенства частот изменения цен на основе критерия  $\chi^2$ ; (iii) выявления ценового лидерства на рынке на основе анализа последовательностей дат принятия ценовых решений предприятиями (табл. 2), в целом подтвердили факт наличия согласованных действий исследуемых предприятий в области ценообразования на рынке фанеры Беларуси. В то же время такое согласование нельзя признать наносящим значительный ущерб потребителям, так как полученная производителями рыночная власть не является чрезмерной. При этом можно предположить, что без согласования ценовых решений финансовое состояние большинства отечественных производителей фанеры было бы неудовлетворительным.

Таблица 2

### Значения индекса Лернера для исследуемых предприятий и результаты тестов на наличие согласования ими цен

Показатель	Значение показателя за				
	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Средневзвешенное значение индекса Лернера	0,225	0,290	0,262	0,200	0,263
Стандартное отклонение индекса Лернера	0,071	0,052	0,065	0,113	0,049
<b>Статистическая значимость тестов на наличие согласования цен (<math>p</math>)</b>					
Коэффициент конкордации $W$ Кендалла	0,208	0,043	0,706	0,112	0,133
Критерий $\chi^2$	0,013	0,797	0,009	0,189	0,446
Тест на выявление ценового лидерства $Z$	0,001	0,189	1,000	0,287	0,403

Примечание: рассчитано авторами на основе преysкурантов цен исследуемых предприятий.

В результате построения шкал фактических ( $\delta$ ) и критических значений фактора дисконтирования ( $\delta^*$ ) для рынка фанеры Республики Беларусь за период 2006–2010 гг., представленных на рисунке, нами установлено:

– соответствие построенных нами теоретических моделей влияния факторов на возникновение и устойчивость согласования цен фактическим параметрам рынка фанеры;

– возникновению и устойчивости ценовых соглашений (согласованных действий) на рынке фанеры Беларуси в исследуемом периоде способствовали: небольшое число участников соглашения, высокие барьеры на вход в отрасль и прозрачность рынка, высокая частота корректировки цен, симметричность затрат и производственных мощностей, а также их избыточность по отношению к спросу, высокие темпы роста спроса и его относительная стабильность.

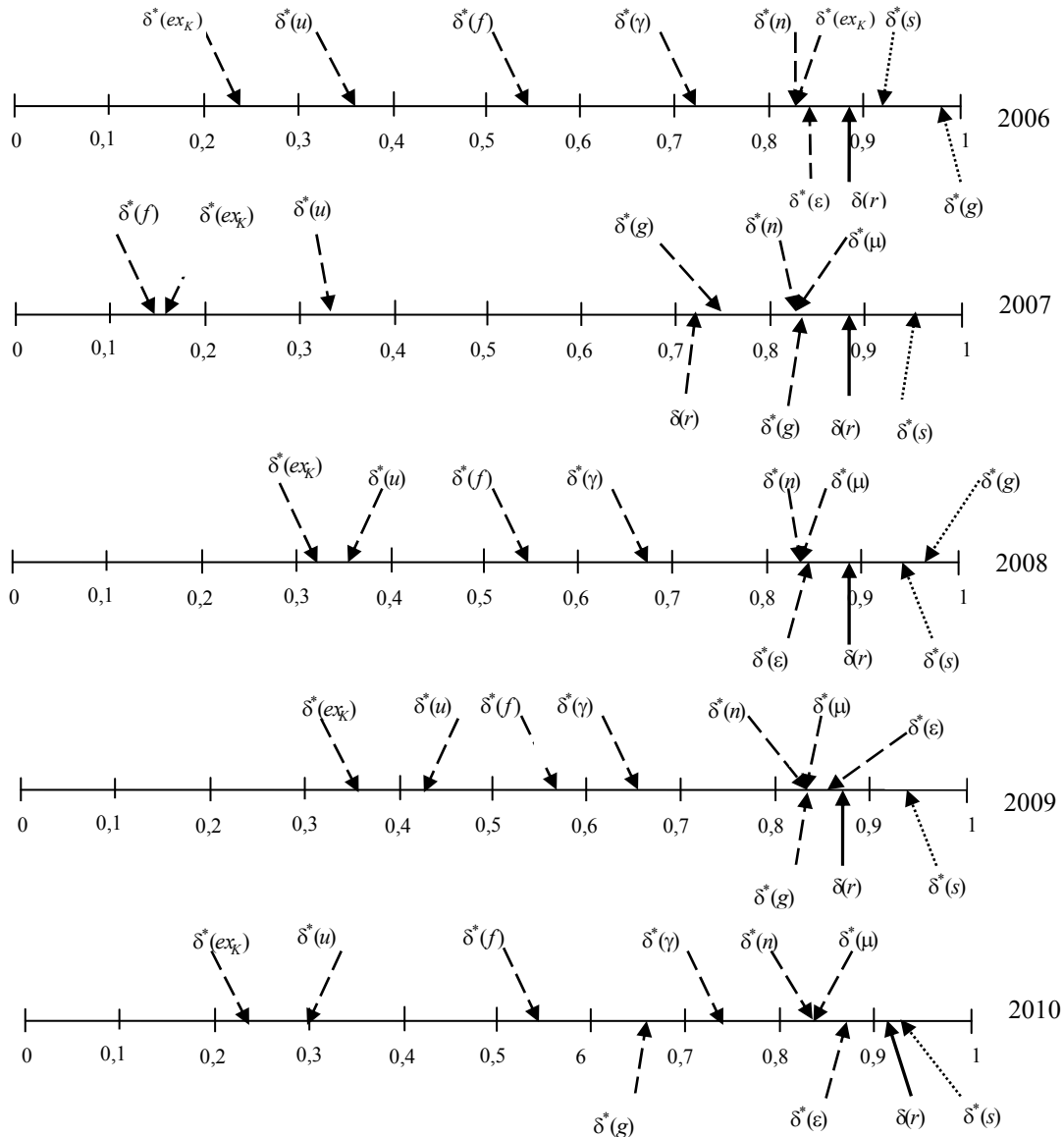


Рис. 1. Шкалы фактических ( $\delta$ ) и критических значений фактора дисконтирования ( $\delta^*$ ) для рынка фанеры Республики Беларусь за период 2006–2010 гг.

Примечания: 1.  $\longrightarrow$  – фактор дисконтирования  $\delta(r)$ ;  $\dashrightarrow$  – пороговое значение фактора дисконтирования, увеличивающееся под воздействием исследуемого фактора;  $\dashrightarrow$  – пороговое значение фактора дисконтирования, снижающееся под воздействием исследуемого фактора. – 2. Разработано авторами.

### Заключение

Проведенное нами исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработаны теоретические модели влияния: (i) структурных факторов (численность производителей, распределение их рыночных долей, барьеры входа и др.); (ii) характеристик внутренней организации отрасли (симметричность производителей по издержкам и производственным мощностям, дифференцированность продукции и др.); (iii) экзогенных макроэкономических условий (уровень процентной ставки, колебания спроса и др.) на возникновение и устойчивость ценовых соглашений на рынке, основывающиеся на моделировании соотношения получаемой взаимодействующими по Берtrandу производителями прибыли в условиях сговора и при его отсутствии. Новизна разработанных моделей заключается в том, что они позволяют объяснить возникновение и устойчивость сговора превышением дисконтированной величины прибыли его участников, скорректированной на величину их количества, распределение долей рынка, длительность периодов взаимодействия, частоту корректировки цен, асимметричность затрат и производственных мощностей, емкость рынка, ценового дифференциала между дифференцированной продукцией производителей, темпа роста спроса, а также вероятность входа новой фирмы на рынок, обнаружения нарушения сговора его участниками и появления продуктовой инновации над дисконтированной величиной прибыли производителей в условиях нарушения сговора и последующей ценовой войны. Применение моделей дает возможность отдельно рассматривать взаимообратное влияние различных факторов сговора на вероятность его возникновения и устойчивость во времени, позволяет государственным антимонопольным органам определять предрасположенность товарных рынков к возникновению ценовых соглашений и разрабатывать меры, направленные на развитие конкуренции и пресечение антиконкурентных действий производителей.

2. Разработана методика прогнозирования возникновения ценового сговора на рынке и его устойчивости во времени, заключающаяся в количественной оценке и нанесении на единую шкалу значений фактического и критических значений фактора дисконтирования для исследуемого рынка в анализируемом периоде. Новизна методики состоит, *во-первых*, в установлении перечня факторов возникновения и устойчивости сговора, а также показателей оценки их величины; *во-вторых*, теоретическом обосновании формул расчета пороговых значений факторов дисконтирования как функций количества участников ценового соглашения, доли рынка наименьшей фирмы, вероятности входа на рынок нового производителя, длительности периода ожидания согласования действий, частоты корректировки цен, вероятности появления в отрасли продуктовой инновации и обнаружения факта нарушения сговора его участниками, отношения индексов Лернера для производителей, коэффициента использования их производственных мощностей, коэффициента избыточности производственных мощностей в отрасли, ценового дифференциала между продукцией участников сговора, темпа роста и величины колебаний спроса. Использование методики позволяет органам антимонопольного регулирования определять вероятность возникновения сговора на рынке, принимать решение о его пресечении на основе прогнозирования устойчивости сговора во времени, разрабатывать меры антимонопольного регулирования рынков, учитывающих их структуру и экзогенные макроэкономические условия.

### Литература

1. Об утверждении Инструкции по выявлению и пресечению антиконкурентных соглашений (согласованных действий) о ценах : Постановление М-ва предприни-

- мательства и инвестиций Респ. Беларусь, 28 апр. 2000 г., № 9 / Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/webnpa/text.asp?r=6&RN=W20003470>. – Дата доступа: 22.08.2011.
2. Abreu, D. Extremal Equilibria of Oligopolistic Supergames / D. Abreu // *Journal of Economic Theory*. – 1986. – № 39. – P. 191–223.
  3. Abreu, D. Optimal Cartel Equilibria with Imperfect Monitoring / D. Abreu, D. Pearce, E. Stachetti // *Journal of Economic Theory*. – 1985. – № 39. – P. 251–269.
  4. Bagwell, K. Collusion over the business cycle / K. Bagwell, R. Staiger // *Rand Journal of Economics*. – 1997. – № 28. – P. 82–106.
  5. Bain, J. Output quotas in imperfect cartels / J. Bain // *Quarterly Journal of Economics*. – 1948. – № 62. – P. 617–622.
  6. Brock, W. A. Price Setting Supergames with Capacity Constraints / W. A. Brock, J. Scheinkman // *Review of Economic Studies*. – 1985. – № 52. – P. 371–382.
  7. Cabral, L. Introduction to industrial organization / L. Cabral. – Massachusetts: MIT Press, 2000. – 356 p.
  8. Chang, M. The Effects of Product Differentiation on Collusive Pricing / M. Chang // *International Journal of Industrial Organization*. – 1991. – № 9. – P. 453–469.
  9. Compte, O. Capacity Constraints, Mergers and Collusion / O. Compte, F. Jenny, P. Rey // *European Economic Review*. – 2002. – № 46 (1). – P. 1–29.
  10. Davidson, C. Excess Capacity and Collusion / C. Davidson, R.J. Deneckere // *International Economic Review*. – 1990. – № 31. – P. 521–541.
  11. Friedman, J. A non-cooperative Equilibrium for Supergames / J. Friedman // *Review of Economic Studies*. – 1971. – № 28. – P. 1–12.
  12. Green, E. Non-Cooperative Collusion under Imperfect Price Information / E. Green, R. Porter // *Econometrica*. – 1984. – № 52. – P. 87–100.
  13. Hackner, J. Collusive Pricing in Markets for Vertically Differentiated Products / J. Hackner // *International Journal of Industrial Organization*. – 1994. – № 12. – P. 155–177.
  14. Haltiwanger, J. The impact of cyclical demand movements on collusive behavior / J. Haltiwanger, J. Harrington // *Rand Journal of Economics*. – 1991. – № 22. – P. 89–106.
  15. Harrington, J.E. Collusion and Predation under (almost) Free Entry / J. E. Harrington // *International Journal of Industrial Organization*. – 1987. – № 7. – P. 381–401.
  16. Harrington, Jr. The determination of price and output quotas in a heterogeneous cartel / Jr. Harrington, E. Joseph // *International Economic Review*. – 1991. – № 32. – P. 767–792.
  17. Ivaldi, M. The Economics of Tacit Collusion / M. Ivaldi [& others] // Report for DG Competition, European Commission [Электронный ресурс]. – 2003. – Режим доступа: [http://ec.europa.eu/competition/mergers/studies\\_reports/the\\_economics\\_of\\_tacit\\_collusion\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/competition/mergers/studies_reports/the_economics_of_tacit_collusion_en.pdf). – Дата доступа: 22.08.2011.
  18. Kuhn, K. U. Fighting collusion by regulating communication between firms / K. U. Kuhn // *Economic Policy*. – 2001. – № 32. – P. 169–204.
  19. Lambson, V. E. Optimal Penal Codes in Price-Setting Supergames with Capacity Constraints / V. E. Lambson // *Review of Economic Studies*. – 1987. – № 54. – P. 385–397.

20. Levenstein, M. What Determines Cartel Success? / M. Levenstein, V. Suslow // *Journal of Economic Literature*. – 2006. – Vol. XLIV. – P. 43–95.
21. Mason, C. Duopoly Behavior in Asymmetric Markets / C. Mason, O. Phillips, C. Nowell // *Review of Economics and Statistics*. – 1992. – № 74. – P. 662–670.
22. Miclos-Thal, J. Optimal Collusion under Cost Asymmetry / J. Miclos-Thal // *Munich Personal RePEc Archive [Электронный ресурс]*. – 2008. – Режим доступа: [http://mpira.ub.uni-muenchen.de/11044/1/mpira\\_paper\\_11044.pdf](http://mpira.ub.uni-muenchen.de/11044/1/mpira_paper_11044.pdf). – Дата доступа: 15.07.2011.
23. Patinkin, D. Multiple-plant firms, cartels, and imperfect competition / D. Patinkin // *Quarterly Journal of Economics*. – 1947. – № 61. – P. 173–205.
24. Ross, T. Cartel Stability and Product Differentiation / T. Ross // *International Journal of Industrial Organization*. – 1992. – № 10. – P. 1–13.
25. Rotemberg, J. A. Supergame-Theoretic Model of Business Cycles during Booms / J. Rotemberg, G. Saloner // *American Economic Review*. – 1986. – № 76. – P. 390–407.
26. Rothschild, R. Cartel stability when costs are heterogeneous / R. Rothschild // *International Journal of Industrial Organization*. – 1999. – № 17. – P. 717–734.
27. Schmalensee, R. Entry Deterrence in the Ready-to-Eat Breakfast Cereal Industry / R. Schmalensee // *Bell Journal of Economics*. – 1978. – Vol. 9. – P. 305–327.
28. Spiller, P. The effects of entry regulation on oligopolistic interaction / P. Spiller, E. Favaro // *Rand Journal of Economics*. – 1984. – № 2. – P. 244–254.
29. Stenbacka, L. R. Collusion in Dynamic Oligopolies in the Presence of Entry Threats / L. R. Stenbacka // *The Journal of industrial economics*. – 1990. – № 2. – P. 147–154.
30. Stigler, G. J. A Theory of Oligopoly / G. J. Stigler // *The Journal of Political Economy*. – 1964. – Volume 72. – Issue 1. – P. 44–61.
31. Vasconcelos, H. Tacit Collusion, Cost Asymmetries and Mergers / H. Vasconcelos // *Rand Journal of Economics*. – 2005. – № 36 (1). – P. 39–62.

*Получено 27.07.2011 г.*

УДК 338.436.33

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР В АПК

**Н. В. ПАРХОМЕНКО, Н. В. ЕРМАЛИНСКАЯ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

В отечественном АПК отмечается интенсификация процесса создания интегрированных формирований, эффективное функционирование которых выступает одним из направлений обеспечения эквивалентности экономических отношений между субъектами хозяйствования, восстановления разрушенных производственно-хозяйственных связей и обеспечения устойчивого и сбалансированного развития соответствующих отраслей. При этом перспективным направлением интеграции в настоящее время является объединение товаропроизводителей в рамках отдельных продуктовых подкомплексов, что в наибольшей степени отвечает как целям интеграции, так и решению задачи продовольственной безопасности. На сегодняшний день разработаны организационно-экономические основы создания продуктовых интегрированных формирований, включая направления развития и степень интеграции субъектов; модели развития интеграционных отношений в условиях реформирования и финансового оздоровления сельскохозяйственных организаций; принципы и механизмы, обеспечивающие управление финансами, внутреннее ценообразование, налогообложение и повышение уровня конкурентоспособности.

Цель исследования состоит в развитии теоретических и методологических положений формирования и оценки эффективности функционирования интегрированных структур в АПК. Достижение изложенной цели предполагает постановку и решение комплекса взаимосвязанных задач, в том числе: раскрыть сущность и содержание категории «эффективность» применительно к функционированию агропромышленных формирований; выполнить сравнительную характеристику подходов к оценке эффективности производственно-экономических систем; научно обосновать необходимость анализа эффективности с позиций двух критериев «эффективность» и «оптимальность»; систематизировать факторы, оказывающие влияние на эффективность, а также критерии ее оценки в разрезе сфер функционирования субъектов агропромышленного производства; выполнить периодизацию процессов создания объединений производителей АПК в условиях Республики Беларусь и дать обобщающую оценку эффективности их деятельности в рамках каждого этапа.

Концептуально обоснование научных положений осуществлялось на основе системного подхода. В процессе исследования применялись методы: монографический, абстрактно-логический, экономико-статистический и др. Информационной базой послужили труды отечественных и зарубежных ученых, разработки научно-исследовательских учреждений.

### **Основная часть**

Агропромышленная интеграция является одной из форм внешней реорганизации аграрных предприятий. Теоретически она создает предпосылки для сохранения



крупнотоварного производства, способствует консолидации финансового, промышленного, торгового капитала и концентрации средств на приоритетных направлениях производства, переработки и сбыта продукции, позволяет согласовать экономические интересы и цели участников технологической цепи и направлена на совершенствование взаимоотношений между сферами АПК. Кроме того, создание крупных производственных структур, выступающих в качестве основного инструмента достижения экономических и социальных целей государства, способствует повышению уровня эффективности макроэкономического регулирования агропромышленного производства.

В зависимости от уровня управления различают интеграцию на макро- и микроуровне. Агропромышленный сектор, как одна из сфер реализации интеграционных явлений, рассматривается нами как микроуровень интеграции, где получают развитие такие ее формы, как горизонтальная и вертикальная интеграция. Кроме того, в процессе объединения предприятий могут создаваться формирования конгломератного типа, представляющие собой совокупность разнотипных субъектов, связанных между собой экономически и (или) юридически, базовым принципом функционирования которых является диверсификация рисков.

В научных публикациях широко освещаются вопросы преимуществ и недостатков отдельных форм интеграции. По оценкам специалистов, наиболее эффективными являются интегрированные формирования вертикального типа и агрохолдинги, имеющие в своем составе предприятия, представляющие все звенья технологической цепочки – от производства сельхозсырья до реализации готовой продукции. Именно в таких структурах обеспечивается приоритет экономических интересов сельскохозяйственных товаропроизводителей, что приводит к выравниванию доходности всех партнеров, развитию между ними взаимовыгодных экономических отношений.

Одним из результатов кооперации и интеграции предприятий АПК является существенное укрупнение субъектов хозяйствования, что признается многими экономистами как позитивное явление с точки зрения эффективности деятельности и дальнейшего развития объединительных процессов. Помимо эффекта масштаба, крупные организации являются потенциально более привлекательными партнерами и объектами инвестирования.

Как показали наши исследования, интеграция предприятий АПК имеет и социально-экономическую значимость, которая состоит в следующем [1]:

- создаются условия для обеспечения населения качественными продуктами питания по ценам сравнительно более низким, чем цены конкурентов, как достижение одной из социально-экономических целей государства в области регулирования аграрного сектора;
- эффективно используются действующие рабочие места и создаются предпосылки для организации новых рабочих мест;
- труд в кооперативно-интеграционных формированиях и на предприятиях аграрного сектора в целом становится мотивированным и привлекательным;
- своевременная оплата труда и ее приближение к уровню других отраслей народного хозяйства являются факторами роста уровня и качества жизни работников;
- создаются необходимые условия для дальнейшего развития территорий, на которых осуществляется деятельность кооперативно-интеграционных формирований, в том числе строительство объектов производственной и социальной инфраструктуры.

Вместе с тем в отдельных исследованиях отмечается возможность возникновения отрицательных эффектов интеграции, составляющих основу относительного снижения эффективности функционирования кооперативно-интеграционных формирований. К их числу относятся: усложнение системы управления, наличие опор-

тунистических тенденций, сокращение загруженности мощностей и производственных возможностей для соблюдения интересов других участников формирований, возможное ухудшение качества сырья или материалов в связи с невозможностью выбора поставщиков, использование ограниченного количества каналов сбыта, потеря входящими субъектами торгового имени.

Разработка научно обоснованных методов оценки эффективности интеграции вызывает необходимость более глубокого изучения экономической сущности категории «эффективность», в том числе применительно к особенностям взаимоотношений субъектов агропромышленного производства. Так, на основании изучения трудов отечественных и зарубежных ученых, посвященных проблеме эффективности с точки зрения ее сущности и экономического содержания, нами установлено следующее:

– отсутствует терминологическое единство в использовании понятия «эффективность» при анализе сложных социально-экономических производственных систем, типичным представителем которых является кооперативно-интеграционное формирование. Как правило, термин «эффективность» используется как синоним результативности, оптимальности, устойчивости (табл. 1);

– в отдельных случаях понятие рассматривается односторонне, т. е. в контексте используемого концептуального подхода исследований. Так, в рамках процессного подхода оценка эффективности сводится к сравнению характеристик «входов» и «выходов» (ресурсов и результатов), с позиций системного подхода эффективность отражает отдельные характеристики качества системы, такие как структурная пропорциональность, сбалансированность, устойчивость;

– расширенное понимание термина «эффективность» может быть сведено к отражению трех аспектов деятельности производственных систем, а именно экономичности, выгодности и целевой эффективности как соотношения результатов и соответственно затрат, потребностей и целей.

Таблица 1

#### Современные подходы к трактовке понятия «эффективность»

Тождественное понятие	Используемая трактовка
<b>1. Экономический подход</b>	
Результативность, продуктивность	Итоговый параметр функционирования производственной системы
<b>2. Производственно-технологический подход</b>	
Оптимальность, сбалансированность системы	Внутренняя характеристика ресурсного потенциала, пропорций между его составляющими
<b>3. Системный подход</b>	
Адаптивность, устойчивость, надежность	Состояние системы, ее способность сопротивляться (приспосабливаться) к внешним воздействиям
Синергетичность	Результат кооперативного взаимодействия подсистем, изменяющий качество системы
<b>4. Рыночный подход</b>	
Конкурентоспособность	Способность сохранять устойчивые позиции в конкурентной борьбе
Полезность	Уровень достижения удовлетворенности запросов потребителей
Инновационность	Способность и реальное использование современных технико-технологических, организационно-экономических и прочих достижений

*Примечание.* Таблица составлена авторами по материалам собственных исследований.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что дальнейшее развитие теории эффективности применительно к анализу интегрированных производственных систем, а также обоснование качественной стороны эффективности целесообразно строить на базе таких категорий, как «результативность» и «оптимальность». С учетом этого нами систематизированы и приведены в табл. 2 основные характеристики указанных подходов.

Таблица 2

**Характеристика подходов к анализу эффективности**

Критерий различия	Ключевые характеристики подхода в позиции	
	результативности	оптимальности
Экономический синоним	Результативность, продуктивность, действенность	Оптимальность, равновесие, сбалансированность
Сущность понятия	Положительные изменения в производственном процессе, соотношение затрат и результатов	Состояние интегрированного производства
Направленность анализа	Ретроспективная (достигнутый промежуточный результат функционирования системы)	Перспективная (целесообразность дальнейшего функционирования системы)
Содержание анализа	Обобщающая характеристика результатов функционирования, измерение ресурсоотдачи	Внутренняя характеристика пропорциональности между составляющими системы
Концептуальная основа анализа	Процессный подход, теория экономии на масштабах, закон экономии времени	Системный подход, Парето-эффективность, закон убывающей отдачи, оптимизационное моделирование
Измерительная система	Система абсолютных и относительных показателей, отражающих соотношение результата и затрат	Система предельных и средних величин (предельная производительность, доходность ресурса и пр.)

*Примечание.* Таблица составлена авторами по материалам собственных исследований.

По нашей оценке, научно-методический аппарат анализа, построенный на данной основе, будет обладать высокой степенью практической реализации и позволит:

- обеспечить возможность проведения комплексного анализа эффективности интеграционного взаимодействия на базе как системного, так и процессного подхода;
- сформировать трендовую систему критериев и показателей оценки (прошлое – настоящее – будущее), включающую параметры, отражающие, с одной стороны, результативность функционирования в предшествующих периодах, с другой – прогнозное состояние и экономические результаты интеграции в будущем.

На основании изучения существующих подходов к оценке эффективности агропромышленной интеграции нами установлено следующее:

- в настоящее время отсутствует единый, общепризнанный инструментарий количественного измерения эффективности интеграции, что обусловлено сложностью и многоаспектностью изучаемого явления, отличиями концепций, а также подбором инструментария экономического анализа исходя из целей проводимой работы;
- методическая общность имеющихся в агроэкономических исследованиях подходов состоит в попытке выработки критериев эффективности интеграции, а также количественного выражения синергетического эффекта взаимодействия. Так, результаты интеграции оцениваются с позиций: *конкурентоспособности* интегрированного объединения на аграрном рынке; устойчивости совместного функционирования

ния участников с позиций *финансового анализа*; наличия *синергетического эффекта* функционирования агропромышленного формирования;

– требуют совершенствования методические разработки по следующим направлениям: оценка *потенциальной эффективности* как создаваемой, так и функционирующей структуры; оценка влияния деятельности объединения на *развитие регионального АПК*; анализ эффективности агропромышленного производства с учетом уровня *интеграции смежных звеньев объединенной технологической цепи*.

Эффективное функционирование агропромышленных формирований, в состав которых входят специализированные и многоотраслевые предприятия, задействованные в единой технологической цепи, в значительной степени обусловлено наличием и направленностью синергетического (дополнительного) эффекта в результате взаимодействия участников. Поэтому одним из основных направлений исследования самоорганизующихся социально-экономических систем, к числу которых можно отнести и агропромышленные объединения, является выявление источников возникновения синергетических эффектов и разработка комплексных, дееспособных механизмов оценки уровня синергии в рамках крупных интегрированных структур.

Достоинством существующих подходов к оценке синергетического эффекта является комплексность, относительная простота расчетных механизмов, доступность используемых оценочных показателей, а также детальный анализ источников возникновения синергетического эффекта. Вместе с тем в ряде случаев отсутствуют конкретные приемы определения части дополнительной прибыли, составляющей синергетический эффект (А. С. Кириленко, И. Кулага, А. Рулинская), допускается совместное использование абсолютных и относительных показателей, что затрудняет возможность интегральной оценки (В. Трофимова), применяются критерии и расчетные механизмы только ретроспективного анализа (сравнение «до» и «после») (И. В. Кулагин, А. Петров, М. И. Запольский).

С учетом этого нами разработана методика определения синергетического эффекта, основанная на поэтапном определении общего уровня синергии путем соотнесения рентабельности (убыточности) интегрированного производства и усредненного уровня рентабельности (убыточности) автономного производства продукции каждым участником. Полученный относительный параметр в дальнейшем может использоваться для определения размера дополнительно полученной прибыли за счет проявления синергии. Методический инструментарий также позволяет оценить вклад каждого участника в общий «синергетический» результат и дать экономическую интерпретацию полученных коэффициентов [2].

Одной из наиболее важных проблем, решение которой способствует эффективному функционированию интегрированных формирований, является разработка методического подхода к распределению доходов между субъектами интеграции. Справедливое распределение доходов между партнерами выступает необходимым условием обеспечения экономического паритета во взаимоотношениях, как одного из принципов кооперации и интеграции. В условиях вертикальной интеграции неравноценными являются расходы и доходы сельскохозяйственных товаропроизводителей, переработчиков и предприятий торговли. Как правило, основное бремя расходов ложится на сельскохозяйственные организации, а основную массу доходов при реализации конечной продукции получают перерабатывающие или торговые предприятия. В настоящее время наиболее известными моделями распределительных отношений являются: нормативно-распределительная (итоговый финансовый результат распределяется пропорционально вкладу каждого участника, который определяется с помощью нормативных показателей); ценовая (взаиморасчеты осуществляются по промежуточному результату с ис-

пользованием внутрифирменных (трансфертных) цен) [3]; нормативно-ценовая (комбинация элементов нормативно-распределительной и ценовой моделей) [4].

Разработанная нами методика распределения прибыли между участниками интегрированного формирования основана на определении коэффициентов весомости вклада участников в общий результат совместной деятельности с использованием гибкого набора поправочных коэффициентов, позволяющих учесть специфические условия хозяйствования (удельные затраты на производство продукции, балльность сельскохозяйственных угодий и др.) [5]. Ее апробация на материалах интегрированных структур Гомельской области позволила выполнить оптимизацию долей фактически распределяемой прибыли с учетом принципов справедливости и максимальной заинтересованности членов в конечных результатах совместной деятельности.

Нами систематизированы факторы, оказывающие влияние на потенциальную и реальную эффективность интеграции. В частности определено, что потенциальный уровень эффективности на стадии создания интегрированной структуры определяется нормативно-правовыми и социально-экономическими условиями, составом, отраслевой специализацией и технологической совместимостью субъектов, обоснованностью выбора интегратора, степенью обоснованности границ сырьевой зоны перерабатывающих предприятий, финансово-экономическим и производственно-техническим состоянием участников, особенностями механизма консолидации имущества. Реальный уровень эффективности формируется в процессе функционирования агропромышленного объединения. Он обусловлен действием следующих факторов: используемые механизмы координации и управления, технико-технологическая модернизация и использование инновационных технологий, система распределительных отношений, механизмы ценообразования и налогообложения, инвестиционная активность интегратора, система материального стимулирования труда и производства, оптимальность пропорций между звеньями технологической цепи, уровень загрузки производственных мощностей, степень удовлетворения сырьевых потребностей за счет внутренних поставок и др.

В наиболее общем виде эффективность агропромышленной интеграции может быть описана следующей системой абсолютных и относительных показателей:

– *в сфере производства сельскохозяйственной продукции*: валовая продукция на 100 га сельхозугодий, урожайность зерновых (картофеля), удой молока на одну корову, среднесуточный привес КРС (свиней), обеспеченность собственным фуражным зерном, среднегодовая численность сельскохозяйственных работников на 1000 га сельхозугодий, производительность труда, фондоотдача, фондоокупаемость и др.;

– *в сфере переработки сельскохозяйственного сырья*: производство готовой продукции в натуральном выражении, производство потребительских товаров, выход товарной продукции из одной тонны переработанного сырья, удельный вес переработанной продукции в собственных цехах от общего объема производства и др.;

– *в сфере реализации готового продовольствия*: выручка от реализации продукции, в том числе сельскохозяйственной, удельный вес экспортных поставок в общем объеме реализации, удельный вес реализации через собственную торговую сеть, прибыль от реализации и др.;

– *эффективность совместной деятельности*: прибыль от реализации продукции, прибыль по конечному финансовому результату (с учетом господдержки), рентабельность реализованной продукции, рентабельность по конечному финансовому результату, суммарная задолженность, среднемесячная заработная плата, в том числе в сельхозпроизводстве, окупаемость инвестиций в основной капитал, удельный вес собственных средств инвесторов в объемах инвестиций и др.

Процесс формирования кооперативно-интеграционных структур в АПК республики осуществлялся поэтапно.

В период 2004–2008 гг. преобладала концепция «убежденной добровольности» или «экономической целесообразности», в рамках которой определяющим мотивом интеграции было финансовое оздоровление сельскохозяйственных организаций и восстановление их производственного потенциала. По данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь на 01.01.2009 г., общее количество интегрированных структур составляло 848, в том числе 754, созданных в форме присоединения, 89 – продажи убыточных организаций как имущественных комплексов [6, с. 17]. За этот период отмечены следующие положительные тенденции [6]:

- снижение удельного веса дотаций из бюджета по отношению к объему производства валовой продукции;

- увеличение удельного веса собственных средств в структуре инвестиций. При этом наилучшие параметры обеспечены в объединениях с комбинатами хлебопродуктов и комбикормовыми заводами – 37 %; с перерабатывающими предприятиями – 50 %; птицефабриками – 67 %;

- расширение масштабов и относительное повышение уровня эффективности сельскохозяйственного производства (увеличение валовой продукции в 2 раза; рост рентабельности по конечному финансовому результату на 16,6 процентных пункта; рост поголовья КРС на 123,9 %, свиней – на 125,7 %; увеличение объемов производства молока и мяса всех видов в 1,9 раза); технико-технологическая модернизация основного производства (в расчете на один объект инвестировано 11,3 млрд р.); рост среднемесячной заработной платы в среднем в 4,4 раза;

- рост производственных показателей в расчете на 1 баллогектар сельскохозяйственных угодий. В 2008 г. наилучших результатов достигли объединения со свиноводческими комплексами (зерно – 47,5 кг), комплексами по выращиванию и откорму КРС (мясо КРС – 5,1 кг), с предприятиями перерабатывающей и пищевой промышленности (молоко – 31,1 кг, мясо КРС – 3,2 кг), с птицефабриками (зерно – 51,7 кг, молоко – 29,3 кг, мясо КРС – 2,3 кг).

По мере решения проблем финансового оздоровления убыточных хозяйств и привлечения инвестиций в сельскохозяйственное производство параллельно начиная с 2006 г. получает развитие *производственно-технологическая концепция интеграции*, доминирующие мотивы которой – развитие межотраслевых связей, диверсификация производства, стабилизация поставок сельскохозяйственного сырья и оптимизация сырьевой зоны перерабатывающих предприятий, решение вопросов маркетинга и сбыта продовольственной продукции и пр. По данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия, по состоянию на 01.01.2010 г. в АПК республики функционирует примерно 110 кооперативно-интеграционных структур, которые имеют различную степень интеграции с учетом отраслевых и региональных особенностей их создания [7, с. 230]. Анализ, выполненный за период 2005–2009 гг., показал, что взаимодействие субъектов хозяйствования в системе кооперативно-интеграционных отношений обеспечило рост урожайности зерновых на 141,4 % (при среднем уровне в АПК 133,8 %), объемов производства зерна – на 311,0 % (при среднем 109,2 %), молока – 229,3 % (при среднем 126,9 %), мяса – 253,6 % (при среднем 122,6 %), производства валовой продукции на 100 га сельхозугодий на 134,9 % (при среднем 123,8 %), производительности труда на 175,8 % (при среднем 159,3 %) объемов реализации сельскохозяйственной продукции на 290,6 % (при среднем 107,7 %). Уровень рентабельности ведения сельскохозяйственной деятельности с учетом господдержки составил 18,7 % (при среднем 10,0 %), объем инвестиций в основной капитал на баллогектар сельхозугодий – 31,6 тыс. р. (при среднем 19,5 тыс. р.).

Отмеченные тенденции являются результатом обоснованного выбора интеграторов, оптимизации состава участников объединений, формирования собственной товаропроводящей сети, создания условий для перехода на самохозяйствование.

### **Заключение**

Таким образом, нами установлено, что процессы разработки эффективных механизмов функционирования кооперативно-интеграционных структур на принципах самокупаемости и самофинансирования находятся на начальной стадии. В этой связи приоритетными направлениями дальнейшего развития агропромышленной интеграции в республике являются: создание сквозных мегакомпаний на уровне государства, построенных на принципах международных транснациональных корпораций; использование научно обоснованных подходов, определяющих эффективный уровень концентрации производства в АПК; применение наряду с «жесткими» вариантами интеграции механизмов контрактации, работающих на принципах стратегического партнерства субъектов; стимулирование кластерных форм взаимодействия; сокращение мер прямого государственного регулирования и перевод субъектов агропромышленного производства на принципы самохозяйствования; построение инновационной модели организации агропромышленного производства.

### **Литература**

1. Механизм совершенствования интеграционных процессов в аграрном секторе экономики / М. И. Запольский [и др.] ; под ред. В. Г. Гусакова. – Минск : Центр аграр. экономики Ин-та экономики НАН Беларуси, 2006. – 267 с.
2. Ермалинская, Н. В. Методика определения синергетического эффекта от совместной производственной деятельности в интегрированных агропромышленных формированиях / Н. В. Ермалинская, Т. Г. Фильчук // Аграр. экономика. – 2009. – № 2. – С. 2–6.
3. Методические рекомендации по созданию и функционированию агропромышленных объединений / В. Г. Гусаков [и др.]. – Минск : Центр аграр. экономики Ин-та экономики НАН Беларуси, 2006. – 152 с.
4. Чухольский, П. Механизм распределительных отношений в продуктовых агропромышленных формированиях / П. Чухольский // Агрэаэкономика. – 2004. – № 8. – С. 26–28.
5. Ермалинская, Н. В. Совершенствование механизма распределения прибыли между участниками интегрированных формирований / Н. В. Ермалинская // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы VII Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 3–4 мая 2007 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – С. 337–339.
6. Бельский, В. И. Экономическая эффективность осуществляемого объединения организаций в агропромышленном комплексе / В. И. Бельский, А. П. Шпак, Н. А. Бычков, М. И. Запольский // Изв. Нац. акад. наук Респ. Беларусь. – 2010. – № 1. – С. 17–26.
7. Запольский, М. И. Эффективность кооперативно-интеграционных отношений в сфере агропромышленного производства. Теория, методология, практика / М. И. Запольский ; под ред. В. Г. Гусакова. – Минск : Ин-т аграр. экономики НАН Беларуси, 2010. – 256 с.

УДК 339.138:332.02

## СПЕЦИФИКА СТРАТЕГИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А. Ю. БЕРДИН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Сужение основных регионов сбыта отечественных предприятий промышленности строительных материалов обусловило необходимость разработки и применения целевых маркетинговых стратегий, максимально учитывающих специфику отрасли и акцентирующих финансовые и трудовые усилия в приоритетном адаптивном векторе. Все это вызывает необходимость активизировать усилия маркетологов в исследовании специфики комплекса промышленного маркетинга (далее КПМ) с последующей расстановкой приоритетов составляющих комплекса при стратегическом планировании.

### Основная часть

На рис. 1 представлена структура КПМ.

<b>1. Товарная политика</b>
1.1) унифицированность производимой продукции (соответствие ГОСТу, ТУ); 1.2) промышленный характер потребления (потребитель не является покупателем); 1.3) низкая степень возможности дифференциации продукции; 1.4) оперативная возможность перехода на продукцию смежных производителей; 1.5) высокие удельные затраты на транспортировку – доминанта местного потребления
<b>2. Распределительная политика</b>
2.1) наличие пиков как максимального роста, так и максимального падения спроса; 2.2) доминирование организационного покупателя (до 95 %); 2.3) ограниченное количество контрагентов на рынке – узость рынка; 2.4) возможность оперативного перехода на продукцию другого производителя; 2.5) приоритетность ритмичности поставок, соблюдения выборки квот; 2.6) доминантная важность завоевания и сохранения степени присутствия на рынке
<b>3. Ценовая политика</b>
3.1) существенная дифференциация ценового уровня по сбытовым регионам; 3.2) высокая важность наличия ценового преимущества; 3.3) значительные сезонные колебания цен (до 100 %); 3.4) наличие преференционных цен при ритмичности выборки продукции, закрытые цены
<b>4. Коммуникационная политика</b>
4.1) узкие каналы специализированных средств коммуникации; 4.2) низкая удельная эффективность массовых средств коммуникации; 4.3) нивелирование эффективности информационного воздействия, важность наличия опыта

*Рис. 1. Особенности маркетинга промышленности строительных материалов*

*Примечание: разработано автором.*

Товарная политика изначально детерминирует предмет и специфику маркетинговой деятельности. Структура распределения продукции полностью обуславливает



ся спецификой реализуемого товарного ассортимента и перечнем целевых рынков сбыта. Ценовая политика в данном случае практически на 100 % детерминирована функционирующей структурой распределения продукции, так как те или иные регионы характеризуются разным уровнем сезонности, внутренних цен, действующей структурой распределения и стоимостью доставки. Уровень актуализации коммуникационной политики в первую очередь определяется спецификой продукции строительных материалов, а затем непосредственно отличительными особенностями рынка реализации, а также условиями ценообразования.

Таким образом, планирование стратегии маркетинга необходимо осуществлять только после четкого структурирования и детерминирования рамок специфики рынка и возможностей предприятия. Нельзя осуществлять разработку исключительно отдельных блоков маркетинга вне общего процесса, так как будет нивелирован принцип взаимообусловленности и последовательности маркетинговых элементов. Изначально любая маркетинговая стратегия должна отталкиваться от товара и внутренней специфики производства предприятия.

Система распределения может использовать прямые продажи, дилерскую ТПС, собственную координирующую или контролирующую ТПС. Соответственно стратегия ценообразования должна учитывать специфику организации сбыта, что может быть выражено условиями 100%-й предоплаты, различными базисами поставок или предоставлением больших отсрочек платежа. Вектор коммуникационной политики, в свою очередь, может быть направлен на конечных потребителей, оптовиков или розничную сеть. Поэтапный анализ процесса образования потребительской ценности за счет интенсификации каждого из основных маркетинговых элементов позволит отечественным предприятиям не только структурировать маркетинговые затраты, но и обеспечить адаптивное стратегическое конкурентное преимущество предприятия в условиях динамичной конкуренции. Стратегическое планирование аспектов распределительной политики промышленного предприятия на сегодняшний день является важнейшей составляющей *КПМ* [1]. Целевые рынки белорусских товаропроизводителей (РФ, Украина, Казахстан, Прибалтика) сократились в среднем на 50 %. Вследствие этого конкурентная борьба за реальных потребителей достигла своего максимума.

Основные факторы, влияющие на разработку распределительной политики промышленного предприятия, показаны на рис. 2. Более детально перечень факторов, обуславливающий специфику и рамки комплекса распределительной политики предприятия промышленности строительных материалов, в контексте каждого из выделенных блоков актуализирует схема, представленная на рис. 3. Совокупность производственных факторов обуславливает такие параметры, как валовой объем выпуска, качество и марочность продукции, физические характеристики. Соответственно целесообразность стратегического планирования распределительной политики возникает исключительно при наличии свободных нераспределенных объемов, градации уровня цен на различных рынках, наличия возможности и целесообразности транспортировки и доставки продукции в другие регионы. Специфика производства также детерминирует уровень допуска в области варьирования объемов выпуска, без причинения ущерба качеству производимой продукции, это, в свою очередь, обуславливает минимальные и максимальные пороговые значения пропускной способности распределительной системы предприятия.

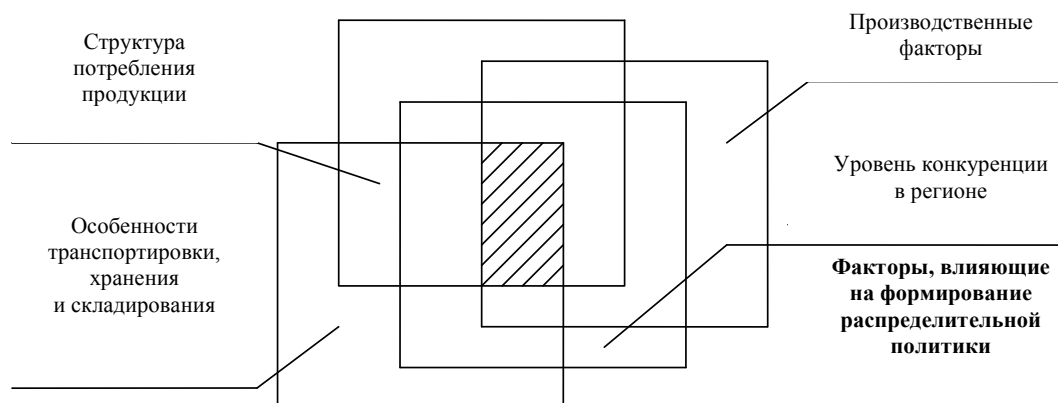


Рис. 2. Факторы, обуславливающие формирование распределительной политики  
Примечание: разработано автором.

Структура потребления промышленной продукции характеризуется различной степенью дифференциации. Некоторые товарные группы используются исключительно в производстве других более сложных промышленных изделий, при этом количество предприятий, использующих в своем производстве данные материалы, может варьироваться от нескольких единиц до нескольких тысяч. Другие товары наоборот находят широкое распространение у непосредственно конечных потребителей данной продукции – физических лиц. Соответственно данный фактор детерминирует градирование форм и методов распределения продукции в целевых рыночных регионах. При этом необходимо учитывать, что иногда до 95 % совокупного объема потребления товара приходится на крупных промышленных потребителей данной продукции.

Таким образом, приоритеты распределительной политики должны быть нацелены именно на крупных корпорационных потребителей. Специфика реализации промышленных товаров состоит в том, что непосредственно конечные потребители – физические лица приобретают уже конечное изделие или конструкцию, состоящую из множества элементов, тем самым напрямую не участвуя в выборе тех или иных комплектующих. В свою очередь небольшие компании или физические лица приобретают продукцию промышленного назначения для собственных нужд в местах мелкооптовой или розничной торговли. Но для того чтобы клиенты сделали выбор в пользу производимой конкретным предприятием продукции, данный товар должен присутствовать в ассортименте магазина. Следовательно, помимо того что производителю необходимо мотивировать конечного потребителя, он должен обеспечить наличие экономической целесообразности у владельцев розничной сети.

При реализации продукции белорусские производители прибегают в основном к железнодорожному и автомобильному транспорту. В связи с вышеизложенным необходимо четко планировать пропускную способность транспортного терминала, исключая возможные сбои в подаче железнодорожных вагонов, автотранспорта. Особенно это актуально при непрерывном производственном процессе, когда необходимо осуществлять ритмичную отгрузку.

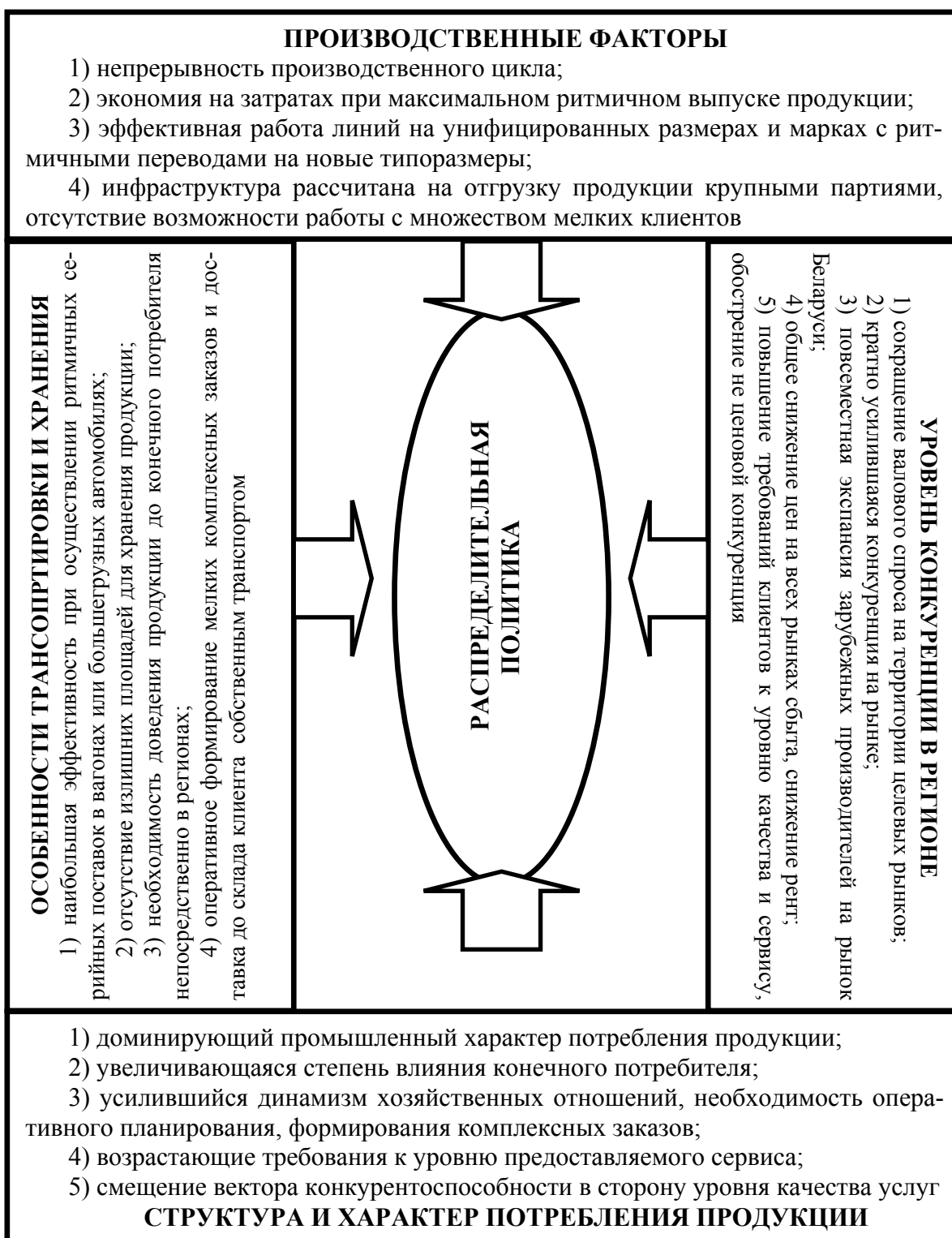


Рис. 3. Детерминированные факторы, обуславливающие формирование распределительной политики промышленного предприятия

Примечание: разработано автором.

При проектировании складского комплекса учитываются специфические характеристики и требования производимых товаров. Некоторые виды продукции не требуют никаких специальных условий хранения, для других необходимо содержать специализированные складские комплексы. Так, при условии производства продукции, харак-

теризующейся высоким коэффициентом сезонности, наличие специализированных складов является необходимым условием. Предприятие может не иметь собственных складов, в таком случае продукция должна скапливаться в период сезонного спада на складах субъектов товаропроводящей сети. При условии рыночного дефицита потенциальные потребители самостоятельно ищут потенциальных партнеров, соглашаются на условия производителей, по возможности стараются не предъявлять рекламаций, так как заинтересованы в стабильных отгрузках продукции. В том случае, если проблем с приобретением алогичной продукции не возникает, клиенты начинают предъявлять более жесткие требования к производителю и его субъектам товаропроводящей сети (ТПС). Сегодня клиенты хотят получать максимальный уровень сервиса в области условий доставки, ритмичности отгрузок, оплаты и оперативности удовлетворения рекламаций, что обуславливает необходимость дифференцированной ТПС.

В настоящих реалиях наличие торгового представителя уже не достаточно. Необходимо отладить максимально эффективную сбытовую политику, вплоть до оперативной доставки клиенту в любое время суток минимальной партии продукции, например, для выполнения срочного заказа, что в свою очередь позволит потребителю не держать собственный склад, а торговому предприятию наработать и сохранить клиентскую базу. На складе необходимо наличие максимально широкого ассортимента продукции, что обеспечит потребителю возможность осуществления комплексных покупок, при этом спектр реализуемой продукции не обязательно ограничивать исключительно производственной программой предприятия, а, наоборот, он должен формироваться исходя из ассортиментных позиций, включаемых потребителями в сборные заявки.

Потребление строительных материалов характеризуется высоким уровнем индекса сезонности. Данный факт обуславливается элементарным нежеланием производить основной объем строительных работ в холодный период времени, что неминуемо влечет за собой тяжелые условия труда, удорожание объекта за счет дополнительных затрат на оборудование, специальные средства, оплату труда. Некоторые строительные работы нельзя производить при температуре наружного воздуха ниже +10 градусов. Вышеизложенное обуславливает отсутствие ритмичности поступления заявок в адрес производителей строительных материалов на приобретение продукции, в связи с чем на складах у производителей даже при условии высокой конкурентоспособности продукции накапливаются большие складские запасы. На некоторых заводах, например, стекольных, объем складских остатков к концу первого квартала может достигать 200 % к среднемесячному объему производства. Так, ведущие производители стекла РФ сегодня имеют объем запасов в размере 150–220 %. Если же брать производителей СНГ минераловатных плит, пенополиэстирола, кирпича и блоков, то усредненная структура динамики складских запасов будет выглядеть следующим образом. По первому кварталу данная величина будет составлять 70–90 % к среднемесячному объему производства. Затем постепенно запасы начинают сокращаться и к концу второго квартала составляют около 30–40 %, а к концу третьего квартала практически полностью реализуются. Остается только текущий запас и неликвиды, составляющие в среднем 5–10 %. Но в четвертом квартале объемы продаж уже начинают сокращаться, особенно в декабре, и к концу года уровень запасов начинает увеличиваться. В первом квартале запасы стремительно растут, что обуславливается рождественскими каникулами и протеканием зимнего периода. Своего абсолютного максимума запасы, как правило, достигают к концу марта – середине апреля, затем начинается постепенное их сокращение. Многие заводы реализуют свои складские запасы только к окончанию строительного сезона – сентябрь–октябрь, а затем снова начинается положительная динамика накопления продукции на складах.

В связи с вышеизложенным уровень цен на строительные материалы также подвержен сезонной ритмичности, что обуславливается соотношением спроса и предложения. Спрос на строительные материалы в течение года может сокращаться в 3–4 раза. Уровень цены не подвержен таким сильным колебаниям, но тем не менее также может колебаться (рис. 4). Если принять за максимум 100 % уровень цен в третьем квартале, то уровень цен в первом квартале достигает 50 % от максимума. Во втором квартале уровень цен начинает расти параллельно уровню спроса, а в четвертом начинает снижаться.

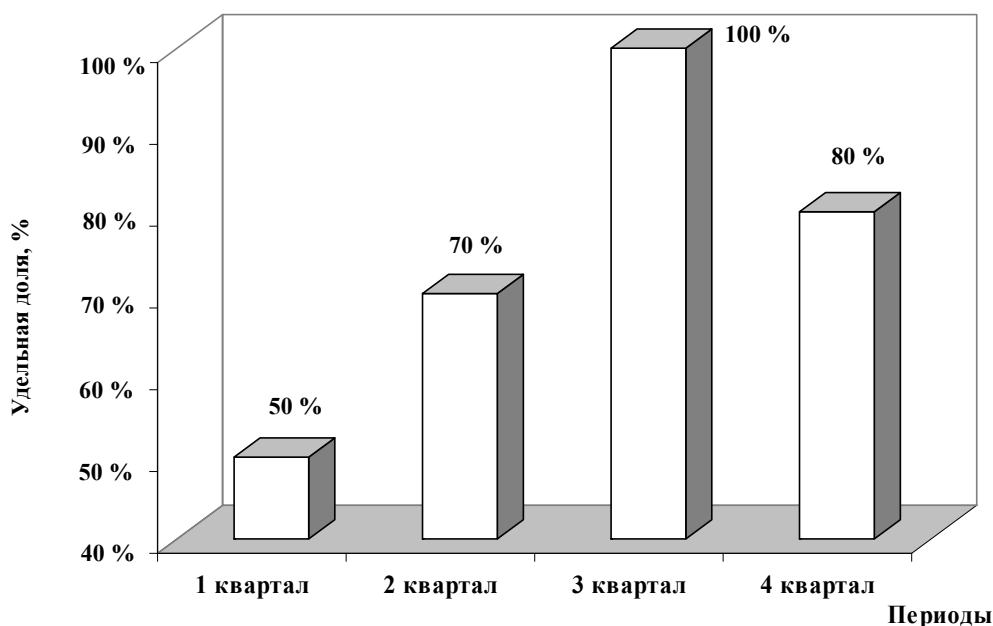


Рис. 4. Структура удельного уровня цен на строительные материалы в течение годового периода<sup>1</sup>

Если потребление некоторых стройматериалов относительно равномерно, то такие материалы, как стекло, утеплители, оконные конструкции в основном используются на третьей фазе строительства, что совпадает с концом третьего квартала. Именно белорусские производители в наименьшей степени защищены в период сезонного сокращения цен, так как не могут в короткие сроки существенно снизить цену, особенно до уровня ниже себестоимости, в отличие от зарубежных производителей, адаптивно реагирующих на колебания рынка. В первом квартале выборку продукции могут осуществлять только постоянные партнеры или субъекты ТПС предприятия, что является критически важным, так как в противном случае все хозяйственные риски производитель будет вынужден нести самостоятельно.

Данная ситуация не может считаться нормальной, так как производители понимают, что осуществлять интенсификацию коммерческих усилий в период так называемого «узкого рынка», когда протекает фаза критического минимума сезонного спроса, не выгодно. Клиенты в любом случае не приобретут продукции больше, чем им будет нужно, а интенсификация коммерческих усилий приводит к резкому обострению конкуренции и снижению цен, что не выгодно ни одному из производителей. Таким образом, завоевание в период узкого рынка дополнительных потребителей исключительно ценовыми методами без долгосрочной распределительной стратегии не будет иметь положительного эффекта.

<sup>1</sup>Цены даны относительно максимального уровня третьего квартала – 100 %.

На сегодняшний день отечественные производители строительных материалов объективно не могут повлиять на эти условия, а могут только разрабатывать и внедрять стратегии, позволяющие частично нивелировать и смягчить или, наоборот, усилить результаты данных тенденций, динамично развивающихся в течение годового периода. Проанализировав совокупность приоритетных факторов, оказывающих влияние на рыночные условия хозяйствования отрасли производства строительных материалов и функции распределения продукции, можно сделать следующие выводы:

- происходит сокращение объемов потребления строительных материалов в период пика сезонного сокращения спроса в 4 раза;
- формируется полимиальная функция структуры динамики образования складских запасов с минимальным объемом в третьем квартале и максимальным во втором квартале (рис. 5);
- отсутствует целесообразность мотивирования конечных потребителей в период спада, так как последние смогут приобрести только необходимый минимальный объем и не более;
- возникает необходимость складирования больших объемов продукции – до 100 % от среднемесячного выпуска;
- происходит возникновение в середине второго и третьем квартале острой необходимости в осуществлении больших объемов отгрузок, существенно превышающих среднемесячное производство;
- наблюдается характерный дефицит оборотных денежных средств в зимний и весенний период, наличие убытков у ТПС в период сезонного спада;
- присутствует сильная динамика цен в течение года – до 50 %;
- снижается уровень конкурентоспособности в период снижения спроса, вследствие отсутствия гибкости в ценовой политике;
- планирование маркетинговой деятельности предприятием-производителем строительных материалов, учитывающим общую динамику спроса, ценового уровня и рентабельности продаж, необходимо в целом на годовой период: собственные складские помещения, альтернативные складские площадки, запас оборотных средств, транспортная пропускная инфраструктура и др.

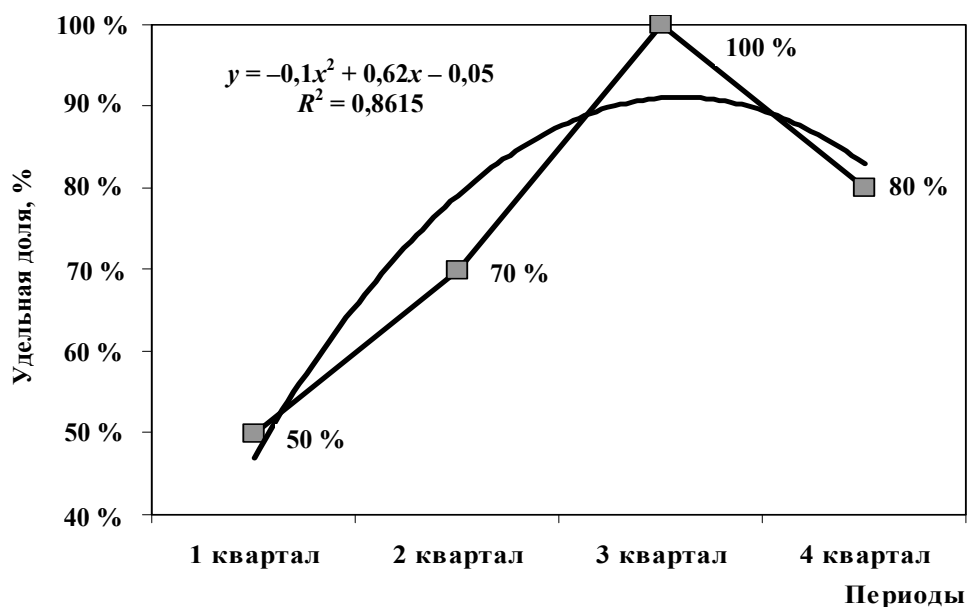


Рис. 5. Анализ динамики удельного уровня цен на строительные материалы в течение годового периода

Совокупность данных приоритетных факторов однозначно обуславливает необходимость развития и поддержания следующих направлений распределительной политики:

- предоставление клиентам максимального уровня сервиса;
- наработка и аккумулярование оборотных средств в период сезонного спроса с целью создания запаса к пику спада реализации;
- гарантии ритмичности реализации продукции, четкое выполнение своих обязательств, заключение как минимум годичных контрактов, распределение платежей или установление рамочных комплексных цен на продукцию;
- обеспечение всего комплекса транспортных и логистических услуг непосредственно в целевом регионе потребителя;
- поддержание постоянного полного ассортиментного перечня продукции в регионах для оперативных отгрузок в течение всего годового периода;
- повсеместное сохранение и расширение степени своего присутствия на целевых рынках посредством развития товаропроводящей сети.

### **Заключение**

Таким образом, определение вектора интенсификации в области реализации стратегии маркетинга в настоящих рыночных условиях является первостепенной задачей промышленного предприятия. Применение авторской методики детерминирования приоритетных элементов КПМ посредством факторного, дискриминантного и кластерного анализа выявило однозначный приоритет распределительной политики как основного фактора формирования стратегической конкурентоспособности предприятий строительных материалов. Анализ специфики распределительной политики отрасли промышленности строительных материалов, рассмотренный в рамках данной статьи, позволил раскрыть и охарактеризовать основополагающие факторы, детерминирующие, актуализацию стратегических решений в области распределительной политики. К сожалению, часто проблемой многих производств является нежелание принимать объективную рыночную действительность. Отечественным производителям необходимо активнее отстаивать свою позицию в вопросах реализации стратегии сезонного сбыта, развития товаропроводящих сетей.

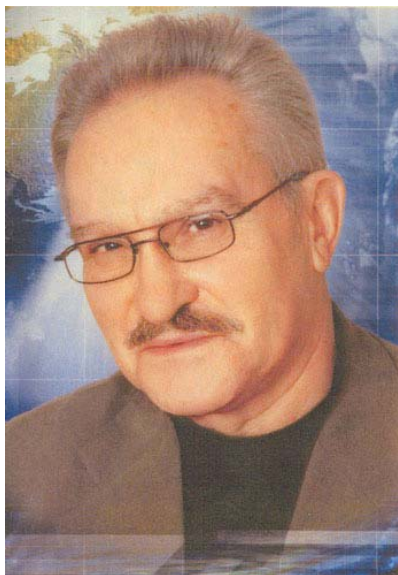
### **Литература**

1. Бердин, А. Ю. Методика детерминирования стратегических приоритетов маркетинговой деятельности промышленного предприятия / А. Ю. Бердин // Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – № 1 (64). – 2011. – С. 181–187.
2. Глубокий, С. В. Товаропроводящая сеть предприятия: эффективные решения по организации, маркетингу и менеджменту / С. В. Глубокий. – Минск : Изд-во Гревцова, 2008. – 376 с.

*Получено 22.08.2011 г.*

### РОВИН ЛЕОНИД ЕФИМОВИЧ

*(К 70-летию со дня рождения)*



19 июня 2011 г. исполнилось 70 лет Леониду Ефимовичу Ровину – выдающемуся инженеру-литейщику, кандидату технических наук, доценту кафедры «Металлургия и литейное производство» ГГТУ им. П. О. Сухого.

После окончания в 1963 г. механико-технологического факультета Белорусского политехнического института Л. Е. Ровин был распределен на работу на кафедру «Машины и технология литейного производства». Трудовой стаж начал в 1962 г. в качестве лаборанта, затем ст. инженера и ассистента той же кафедры. В 1969 г. окончил аспирантуру и успешно защитил кандидатскую диссертацию по шахтным печам, направление «Металлургия».

Начиная с 1970 г. занимается научно-исследовательской деятельностью в области экологии литейного производства. В 1972 г. Леонид Ефимович организовал и возглавил первую в СССР отраслевую лабораторию очистки газовых выбросов в литейном производстве – «НИЛЮгаз». Среди научно-технических разработок Л. Е. Ровина можно отметить первые в Беларуси коксо-газовые вагранки (1965 г., з-д им. Октябрьской революции, г. Минск), пылеуловители и узлы дожигания для вагранок (оснащено подавляющее большинство печей в СССР начиная с 1972 г.), системы тонкой очистки выбросов от плавильных печей (г. Минск, Гомель, Киев, Таганрог и др.). Более 100 заводов в СССР были оснащены такими установками и системами, многие из этих установок работают и теперь.

В 1983 г. Л. Е. Ровин был избран по конкурсу доцентом Гомельского политехнического института, где и работает по настоящее время.

Леонид Ефимович вел и продолжает вести большую общественную работу. В 1992 г. был избран председателем профкома ГПИ и возглавлял его до 2000 г. В 1995 г. за большой вклад в развитие отношений между ОКБ Сухого и ГГТУ им. П. О. Сухого Л. Е. Ровин был награжден Почетной грамотой и юбилейной медалью ОКБ Сухого.

В 1995 г. Л. Е. Ровин был избран заведующим кафедрой «Машины и технология литейного производства» и руководил ею 15 лет.

На протяжении всего периода научной деятельности Леонид Ефимович вносит достойный вклад в развитие науки. Им опубликовано более 200 научных работ, получено 24 патента и авторских свидетельств, причем практически все они внедрены. Он является руководителем ряда фундаментальных научно-исследовательских работ по важнейшим госбюджетным темам в области ресурсо- и энергосбережения. В 2009 г. Л. Е. Ровину за разработку и внедрение на РУП «ГЛЗ «Центролит» установки для переработки чугуновой стружки в ротационной печи присуждена премия Министерства промышленности Республики Беларусь в номинации «Энергосберегающее оборудование, техника и технологии». Наиболее значимые проекты, выполненные за последние годы под руководством Л. Е. Ровина:



- ротационные наклоняющиеся плавильные и нагревательные печи;
- технология внедоменного малотоннажного получения железа из оксидов (рециклинг окалины и металлургической пыли);
- автоматизированные ваграночные комплексы и модернизация действующих ваграночных установок;
- системы рекуперации и утилизации тепла для топливных плавильных и нагревательных печей.

Установки высокотемпературного подогрева шихты для электроплавки чугуна и стали.

Практически все вышеперечисленные разработки отмечены дипломами и медалями престижных международных выставок и конкурсов, в том числе «Петербургской технической ярмарки», «Московского международного салона инноваций и инвестиций» и др.

Л. Е. Ровин является членом-корреспондентом Белорусской инженерной академии и Международной академии наук экологии и безопасной жизнедеятельности.

Почти полвека Леонид Ефимович занимается преподавательской деятельностью, за это время им подготовлено более 1100 инженеров-литейщиков и инженеров-металлургов, которые трудятся сегодня практически на всех предприятиях республики, а также на многих заводах России, Украины, Прибалтики и других стран. У студентов и выпускников пользуется заслуженным авторитетом.

За последние годы под его непосредственным руководством и прямом участии внедрено или модернизировано более 15 новых промышленных установок в Беларуси, России и Казахстане.

Без сомнения, список Ваших славных дел еще многократно приумножится. Редакция журнала «Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого» поздравляет Леонида Ефимовича с юбилеем, желает крепкого здоровья, благополучия на долгие годы, новых творческих свершений, радостных и ярких событий, неиссякаемой бодрости и оптимизма.

*УДК 621.762*

**Бобарикин Ю. Л., Шишков С. В. Способ изготовления полосового антифрикционного металлофторопластового материала**

Представлены сведения по формированию бронзо-фторопластового антифрикционного материала, отличающегося от аналогов регулируемой пористостью бронзового слоя и расширенным диапазоном эксплуатационных характеристик.

**Bobarykin Y. L., Shishkov S. V. The Method of Producing Strip Antifriction Metal-Fluoroplastic Material**

The data on forming bronze-fluoroplastic antifriction material is presented in the paper which differs from analogues by controlled porosity of bronze layer and a wider range of operational characteristics.

*УДК 621.225.7+621.653*

**Михневич А. В., Стасенко Д. Л. Некоторые вопросы форсирования по давлению аксиально-поршневых гидромашин**

Приведены результаты исследования динамики распределительных узлов аксиально-поршневых гидромашин при их форсировании по давлению. Показано, что при высоких давлениях рабочей жидкости в распределительном диске возникают значительные упругие деформации серповидных окон, которые могут приводить к нарушению режимов гидродинамического трения в распределительном узле. Приведены расчетные и экспериментально-измеренные величины упругих деформаций серповидных окон распределительного диска. Показано различное влияние упругих деформаций на режимы работы распределительных узлов со сферическим и плоским распределительными дисками. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что сферическая конфигурация распределительного диска накладывает принципиальные ограничения на возможность существенного форсирования аксиально-поршневой гидромашин по давлению.

**Mikhnevich A. V., Stasenko D. L. Some Problems of Pressure Forcing of Axial-Piston Hydraulic Machines**

The results of the study of the dynamics of distribution centers of axial-piston hydraulic machines during their pressure forcing are presented. It is shown that at high pressures of operating fluid in distributor disk considerable elastic deformation of crescent ports occurs which can result in troubles in hydrodynamic friction condition in the distribution center. Design and experimental-measured values of elastic deformation of crescent ports of the distributor disk are given. Different influence of elastic deformation on operating conditions of distribution centers with spherical and flat distributor disks is shown. Based on the studies conducted a conclusion is made that spherical configuration of the distributor disk imposes principal limitations on considerable pressure forcing of axial-piston hydraulic machine.

*УДК 621.9.011:517.962.1*

**Туромша В. И., Довнар С. С., Трусковский А. С., Туми Эль-Мабрук Абужафер Али. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри»**

Методами математического моделирования установлено, что основными деталями, обуславливающими на 2/3 податливость подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри», являются траверса и стойка. В меньшей степени податливость зависит от саней (9 %). Траверса станка нуждается в увеличении крутильной жесткости. Стойке и саням необходим подъем изгибной жесткости в вертикальной продольной плоскости.

Снижение податливости портала достигается заполнением внутренних полостей деталей несущей системы станка полимербетоном. У любой базовой детали это поднимает жесткость не менее чем в 2 раза. Важно использование вставок из полимербетона одновременно в трех основных деталях портала – в траверсе, стойке и санях. Благодаря эффекту синергизма, являющегося результатом взаимодействия между соседними базовыми деталями, жесткость портала во всех направлениях повышается в среднем до 2,2 раз.

**Turomsha V. I., Dounar S. S., Truskowskij A. S., Tumi El-Mabruk Abu Jafer Ali**  
**The Analysis of Stiffness of Gantry Portal of Bed Milling Machine of Gantry Type**

CAE simulation revealed that the traverse and the column are responsible for 2/3 of flexibility of the gantry portal of gantry-type bed milling machine. In a less degree flexibility depends on slider design (9 %). The traverse of the machine requires more torsion rigidity. The column and the slider need the increase of bending rigidity in longitudinal vertical plane.

Portal stiffness can be increased by polymer concrete filling of inner cavities of the portal supporting parts. Filled inserts increase stiffness of any basic part minimum by 2 times. It is important to apply polymer concrete inserts simultaneously in three basic parts i.e. in the traverse, in the column and in the slider. Simultaneous filling of adjacent portal parts results in synergetic effect. This leads to greater stiffening effect when stiffness of the portal is increased by 2.2 on the average in all directions.

УДК 538.3

**Василевич Ю. В., Остриков О. М. Метод расчета компонент тензора локализованной пластической деформации и тензора плотности дислокаций у границ некогерентного двойника**

Разработан метод расчета распределения компонент тензора пластической деформации, тензора пластической дисторсии, тензора плотности дислокаций в случае двойникования. Предложен метод задания распределения дислокаций у двойниковых границ. Установлено, что в случае двойникования пластическая деформация локализуется у двойниковых границ.

**Vasilevich Y. V., Ostrikov O. M. Method of Computation of Localized Plastic Deformation Tensor Components and Dislocation Density Tensor near Non-Coherent Twin Boundary**

The method is developed for computation of distribution of plastic deformation tensor components, plastic distortion tensor and dislocation density tensor in case of twinning. The method of presetting dislocation distribution at twin boundaries is presented. It is established that in case of twinning plastic deformation is localized at twin boundaries.

УДК 621.9.0116517.962.1

**Михайлов М. И., Ромачков А. Н. Анализ статической прочности и точности координатного стола многоцелевого станка с вертикальным шпинделем**

Разработана методика анализа статической точности и прочности координатного стола многоцелевого станка с вертикальным шпинделем, позволяющая учесть конструктивные параметры стола станка с особенностями применяемых материалов и условий контакта между элементами. Произведены расчеты и экспериментальные исследования влияния материала накладок направляющих крестового стола на его статическую точность. Установлена доля влияния податливости каждого элемента крестового стола.

**Mikhailov M. I., Romachkov A. N. The Analysis of Static Accuracy and Strength of Coordinate Table of the Multipurpose Vertical Type Machine Tool**

The methods of the analysis of static accuracy and strength of coordinate table of multipurpose vertical type machine tool are developed enabling to allow for design parameters of

the table together with specific features of the material applied and conditions of contact between the elements. Computations and experimental studies of the influence of material of guide element liners of cross motion table on its static accuracy are conducted. The degree of the influence of compliance of each element of the cross motion table is established.

*УДК 621.311*

**Зализный Д. И., Медведев К. М., Потапенко Н. В. Стенд для изучения диспетчерского управления в электрических сетях**

Описана конструкция, а также особенности функционирования лабораторного стенда, предназначенного для ознакомления студентов с работой оперативно-диспетчерского персонала энергосистем. Предложена методика автоматического учета положения высоковольтных выключателей при расчете установившегося режима электрической сети.

**Zaliznii D. I., Medvedev K. M., Potapenko N. V. A Stand for Studying Dispatch Control in Electric Networks**

The design and specific features of functioning of the laboratory stand are described. The stand is designed for studying by the students the work of operational-dispatch personnel of electric supply network. The methods of automatic accounting of the positions of high voltage switches during computation of steady-state condition of electric network are proposed.

*УДК 621.311.003.11*

**Кротенок В. В., Рабская Ю. В. Технико-экономическое обоснование выбора места расположения подстанции**

Рассмотрен вопрос о существующих методах определения местоположения понижающей трансформаторной подстанции ПТП. Составлены алгоритмы и программные фрагменты для расчета местоположения ПТП существующими методами, а также методом сопряженных градиентов. Приведены результаты исследований в численном и графическом виде. Приведена оценка эффективности метода сопряженных градиентов.

**Krotenok V. V., Rabskaya Y. V. Technical and Economic Assessment of Choosing a Position of Substation**

The problem of the existing methods of choosing the position of a step-down transformer substation is considered. Algorithms and program segments for the computation of the position of the step-down transformer station with the existing methods and also with conjugate gradient method are designed. The results of the study in numerical and graphic forms are presented. The assessment of the efficiency of conjugate gradient method is given.

*УДК 621.313.333*

**Денисюк Ю. Ю. Вибродиагностирование электрических машин в условиях помех и неопределенностей**

Рассмотрены типовые ошибки и помехи в процессе диагностирования, которые обусловлены следующими причинами: неопределенности в процессе диагностирования; отсутствие информации о подшипниках качения; отсутствие статистических данных о динамике износа; сложность определения предельных значений параметров вибрации для каждого механизма.

**Denisiuk Y. Y. Electric Machine Vibration Diagnostics in the Conditions of Interference and Uncertainty**

Typical errors and interference in the process of diagnostics are considered which are conditioned by the following reasons of uncertainty in the process of diagnosing: non-availability of the information about rolling bearings; non-availability of statistic data on wear dynamics, complicated character of determining limit values of vibration parameters for each mechanism.

УДК 62-83-52

**Захаренко В. С., Дорощенко И. В. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения**

Рассмотрен порядок получения математической модели асинхронного электродвигателя для случаев несимметричных схем включения и (или) для случаев с необходимостью учета процессов коммутации в источнике питания. Также приведены особенности работы с такими моделями, выявленные в ходе апробации.

**Zakharenko V. S., Doroschenko I. V. Specific Features of Simulation Modeling of Asynchronous Motor for Making a Model Allowing for Switching with Asymmetrical Closed Circuits Also**

The procedure of making a mathematical model of asynchronous electric motor for the cases of asymmetrical closed circuits and (or) for the cases of allowing for the processes of switching in power source is considered. Specific features of the work with such models revealed during testing are given.

УДК 621.311

**Гуминский А. Н. Повышение эффективности режимов работы двухтрансформаторной подстанции**

Рассмотрены эффективные режимы работы двухтрансформаторной подстанции с точки зрения минимизации потерь мощности в трансформаторах. Основываясь на общепринятых принципах выбора мощности силовых трансформаторов, а также исходя из приоритетных направлений Республиканской программы «Энергосбережение», определены особенности выбора мощностей трансформаторов понижающих подстанций. Дано аналитическое и графическое определение значениям граничных мощностей нагрузки, при которых эффективно изменять режим работы подстанций как на понижающих подстанциях с трансформаторами одинаковой номинальной мощности, так и на понижающих подстанциях с трансформаторами разной номинальной мощности. Рассмотрен технический аспект перехода от одного режима работы подстанции к другому исходя из двух позиций: ручной переход и автоматический. Определены условия применения ручного и автоматического перехода между режимами питания нагрузки одним и двумя трансформаторами.

**Guminski A. N. Improving the Efficiency of Operating Modes for Two-Transformer Substation Operation**

Efficient operating modes of two-transformer substation with a view to power loss minimization in transformers are considered. Based on conventional principles of choosing power values for power transformers and on the basis of priority lines of governmental program “Energy Saving” specific features of choosing transformer power values for step-down substations are determined. Analytical and graphical definitions of limiting values of load power are given which are suitable for changing substation operating mode of step-down substations performing with transformers of the same rated power as well as with transformers of different rated power. Engineering aspect of change-over from one operating mode to the other from two positions by using manual and automatic switching is considered. The conditions for applying manual and automatic change-over between the modes of power supply to the load by single or two transformers are defined.

УДК 338.532.4.025.24:674.5

**Ивановская И. В., Драгун Н. П. Факторы возникновения и устойчивости ценовых соглашений на рынке**

В статье представлены: (i) теоретические модели влияния структурных факторов, характеристик внутренней организации отрасли, экзогенных макроэкономических усло-

вий на возникновение и устойчивость ценовых соглашений на рынке, основывающиеся на моделировании соотношения получаемой взаимодействующими по Бертранию производителями прибыли в условиях сговора и при его отсутствии; (ii) методика прогнозирования возникновения ценового сговора на рынке и его устойчивости во времени, заключающаяся в количественной оценке и нанесении на единую шкалу значений фактического и критических значений фактора дисконтирования для исследуемого рынка в анализируемом периоде; (iii) результаты апробации указанных методик на примере рынка фанеры Республики Беларусь. Применение разработанных методик дает возможность отдельно рассматривать взаимообратное влияние различных факторов сговора на вероятность его возникновения и устойчивость во времени, позволяет государственным антимонопольным органам определять предрасположенность товарных рынков к возникновению ценовых соглашений и разрабатывать меры, направленные на пресечение антиконкурентных действий производителей.

**Ivanovskaya I. V., Dragun N. P. The Factors of Occurrence and Stability of Price Agreements on the Market**

The article presents (i) theoretical models of the influence of structural factors, characteristics of internal organization of the industry, exogenous macroeconomic conditions of the occurrence and stability of price agreements on the market based on modeling a relationship of the profit values obtained by interaction of Bertrand producers in the conditions of collusion and without collusion; (ii) methods of forecasting the occurrence of a collusion on the market and its stability in time consisting in quantitative assessment and applying a single scale to actual and critical threshold values of discount factor for the market under study during the period analyzed; (iii) results of testing the above methods on the plywood market of the Republic of Belarus taken as an example. Application of these methods enables to separately consider reciprocal influence of different factors of collusion on the probability of its occurrence and stability in time and enables governmental antitrust authorities to reveal propensity of commodity markets for the occurrence of price collusions and work out measures aimed at preventing anti-competition behavior of manufacturers.

*УДК 338.436.33*

**Пархоменко Н. В., Ермалинская Н. В. Теоретические и методологические аспекты эффективного функционирования интегрированных структур в АПК**

Раскрыты основные экономические и социальные преимущества создания интеграционных структур в агропромышленном комплексе, выполнено теоретическое обоснование условий их эффективного функционирования. Систематизированы научные подходы к оценке эффективности сложных производственно-экономических систем, определены ключевые характеристики эффективности интеграции с позиций результативности и оптимальности. Обоснована система факторов эффективности интеграции и показателей для оценки ее уровня. Выполнена оценка эффективности функционирования интеграционных структур и предложены перспективные направления дальнейшего развития интеграционных отношений в агропромышленном комплексе. Полученные результаты создают основу для разработки методик оценки эффективности интеграции и могут быть использованы для дальнейших научных исследований в этой области.

**Parkhomenko N. V., Yermalinskaya N. V. Theoretical and Methodological Aspects of Efficient Functioning of Integration Structures in Agro-Industrial Complex**

Major economic and social advantages of creating integration structures in agro-industrial complex are revealed, theoretical substantiation of the conditions of their efficient functioning is provided. Scientific approaches to the evaluation of complex production and economic system efficiency are systematized, key characteristics of integration efficiency with regard to effectiveness and optimality are defined. The system of integration efficiency factors and indica-

tors for the evaluation of integration level is validated. Evaluation of integration structure performance efficiency is provided and perspective lines of development of integration relations in agro-industrial complex are proposed. The data obtained provides the basis for developing methods of evaluating integration efficiency and can be used for further research in this area.

*УДК 339.138:332.02*

**Бердин А. Ю. Специфика стратегии распределительной политики предприятий промышленности строительных материалов**

Сужение основных регионов сбыта отечественных предприятий промышленности строительных материалов обусловило необходимость разработки и применения целевых маркетинговых стратегий, максимально учитывающих специфику отрасли рынка и акцентирующих финансовые и трудовые усилия в приоритетном адаптивном векторе. Все это вызывает необходимость активизировать усилия маркетологов в исследовании специфики комплекса промышленного маркетинга (КПМ) с последующей расстановкой приоритетов составляющих комплекса при стратегическом планировании. Применение авторской методики детерминирования приоритетных элементов КПМ посредством факторного, дискриминантного и кластерного анализа выявило однозначный приоритет распределительной политики как основного фактора формирования стратегической конкурентоспособности предприятия. Это обуславливает тот факт, что отечественным производителям необходимо активнее отстаивать свою позицию в вопросах реализации стратегии сезонного сбыта. Соответственно необходимо развивать соответствующую инфраструктуру, обеспечивающую сохранность продукции, а параллельно заключать долгосрочные годовые контракты и искать формы оптимального обоюдывыгодного разделения рисков со своими контрагентами.

**Berdin A. Y. Specific Character of the Strategy of Distribution Policy of Constructional Materials Industry Enterprises**

Shrinkage of major market regions of domestic constructional material producing enterprises caused the necessity of developing and applying goal-oriented marketing strategies maximally taking into account the specificity of market sectors and concentrating financial and labour efforts in a priority adaptive vector. All this necessitates intensification of marketing specialist work on the study of the specificity of industrial marketing complex with the following determination of the priorities of the complex components during strategic planning. Applying the author's methods of determining priority components of the industrial marketing complex by factor, discriminant and cluster analysis revealed definite priority of distribution policy as the major factor of the formation of strategic competitiveness of an enterprise. This preconditions the fact that for domestic manufacturers it is necessary to more actively advocate their position in implementing the strategy of seasonal market. Accordingly it is necessary to develop an appropriate infrastructure ensuring product safekeeping and at the same time conclude long-term year-long contracts and also search for the forms of optimum mutually beneficial sharing risks with the contractors.