

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕМОНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

С.О. Хомутов, В.А. Рыбаков

*Повышение эффективности сельскохозяйственного производства невозможно без грамотной организации обслуживания и ремонта установленного электрооборудования. Разработанная во времена СССР система ППРиТО не позволяет гибко управлять расходованием денежных средств на данный процесс, что приводит к несвоевременности и низкому качеству выполнения восстановительных мероприятий, и, как следствие, к значительному росту количества внезапных отказов электрических двигателей. Выходом из сложившейся ситуации является разработка и внедрение систем ситуационного управления процессом массового обслуживания электрооборудования, позволяющих снизить убытки от простоя двигателей в 2 – 3 раза и общие затраты на их эксплуатацию на 10 – 15 %.*

Разработанная в соответствии с существовавшими во времена СССР нормами экономических взаимоотношений система мероприятий планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования (ППРиТО) в условиях современной рыночной экономики оказывается неэффективной для большинства сельскохозяйственных предприятий по следующим причинам:

1) планирование периодичности и объемов ремонтных мероприятий с использованием данной системы базируется только на нормативах заводов-изготовителей [1, 2] и не учитывает возможность их невыполнения из-за отсутствия денежных средств на счете предприятия;

2) высокие цены на горюче-смазочные материалы делают невозможной транспортировку вышедшего из строя электрооборудования на значительные расстояния и вынуждают хозяйства обращаться к близко расположенным мелким мастерским, нормы технологического процесса на которых зачастую не соблюдаются;

3) наводнение отечественного рынка дешевыми импортными продуктами питания требует от предприятий АПК значительного повышения эффективности всего производства, в том числе обслуживания и ремонта электрооборудования, однако система ППРиТО не позволяет гибко управлять расходованием денежных средств на данный процесс.

Несвоевременность и низкое качество выполнения восстановительных мероприятий приводит к значительному снижению суммарного остаточного ресурса установленного электрооборудования, в результате чего повышается количество внезапных отказов, и, как следствие, увеличиваются издержки

сельскохозяйственных производителей. При этом на долю электрических двигателей (ЭД) приходится около 95 % всех потребителей электроэнергии в АПК.

Анализ количественных показателей выхода ЭД из строя позволил получить достаточно адекватную картину сложившейся на сегодняшний день в агропромышленном комплексе России ситуации по отказам электрооборудования. Так, в настоящее время более 60 % отказов электродвигателей приходится на время их напряженной работы (посевная и уборочная компании). При этом убытки от простоя ЭД составляют от 300 до 10000 рублей в сутки [3]. Кроме того, регулярно возникает ситуация, когда отказавший электрический двигатель, установленный на ответственном технологическом оборудовании, не имеет регламентированного системой ППРиТО подменного резерва, а на расчетном счете хозяйства отсутствует достаточное количество денежных средств для его оперативного ремонта. При этом продолжительность простоя производственных мощностей может составлять две недели и более. Как следствие, убытки от отказа двигателя значительно превосходят стоимость нового ЭД и наносят значительный ущерб финансовому состоянию хозяйства.

Для оценки динамики отказов электродвигателей при непосредственном участии авторов были проведены статистические исследования по сопоставлению аварийности во времена СССР, когда действовала система ППРиТО, и в настоящее время. Для удобства выполнения данных исследований была выбрана группа хозяйств, которые сохранились со времен СССР. Информация по отказам электрических двигателей за 2005 г., предоставленная отделом механизации Главного управления сельского хозяйства

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕМОНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

администрации Алтайского края, приведена в таблице 1. Для сравнения, в таблице 2 представлены аналогичные показатели за 1987 г.

Таблица 1  
Количество вышедших из строя электродвигателей в ряде хозяйств Алтайского края за 2005 г.

Наименование предприятия	Кол-во установленных ЭД	Кол-во отказавших ЭД	В % от числа установленных
ЗАО «Белоярское»	38	6	16
Колхоз «Заря»	127	32	25
ЗАО «Бурановское»	86	10	12
Ащегульское коллективное сельхозпредприятие	91	9	10
ОАО «Великий октябрь»	158	41	26
Совхоз «Зеленый клин»	164	37	23
КГУП «Центральный»	152	24	16

Таблица 2  
Количество вышедших из строя электродвигателей в ряде хозяйств Алтайского края за 1987 г.

Наименование предприятия	Кол-во установленных ЭД	Кол-во отказавших ЭД	В % от числа установленных
Колхоз «Белоярский»	49	4	8
Колхоз «Заря»	162	26	16
Совхоз «Бурановский»	144	12	8
Совхоз «Ащегульский»	87	5	6
Колхоз «Великий октябрь»	236	32	14
Совхоз «Зеленый клин»	179	20	11
Колхоз «Центральный»	260	18	7

Анализ полученных данных показал, что, несмотря на сокращение парка двигателей за период с 1987 по 2005 гг., процент их выхода из строя увеличился в среднем более чем в 2 раза. В свою очередь, согласно [4], за аналогичный период стоимость ремонта ЭД относительно стоимости нового электродвигателя возросла с 19 – 20 % до 28 – 30 %. Все это привело к тому, что затраты на ремонт элек-

тродвигателей увеличились в среднем в 3 раза. Другими словами, эффективность организации технического обслуживания и ремонта электрооборудования в агропромышленном комплексе России и стран СНГ на сегодняшний день является неудовлетворительной.

Таким образом, существует противоречие между спецификой эксплуатации электрических двигателей в современных условиях сельскохозяйственного производства и невозможностью управления данным процессом с помощью разработанной ранее системы планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования.

Выходом из сложившейся ситуации может являться разработка и применение систем управления процессом массового обслуживания (ПМО) электрооборудования [5]. Как показал зарубежный опыт и результаты проведенных авторами исследований, при массовом использовании подобных систем возможно снижение убытков от простоя электрооборудования в 2 – 3 раза и снижение общих затрат на его эксплуатацию на 10 – 15 %.

Процесс эксплуатации электродвигателей любого агропромышленного предприятия является процессом массового обслуживания и его решение описывается в терминах этой теории [3]. При этом объектом исследования является сама система массового обслуживания (СМО), которая характеризуется случайными входящими дискретными потоками заявок – отказами двигателей – и задержками в их обслуживании, вызванными ограниченностью ресурсов системы. Характерной особенностью данной системы на сегодняшний день являются большие материальные потери, обусловленные простоем ЭД, ожидающих ремонта. Основная с практической точки зрения задача обеспечения максимально возможной эффективности достигается за счет оптимизации функционирования СМО посредством ситуационного управления процессами массового обслуживания вышедших из строя электродвигателей с целью минимизации времени их простоя.

Практическая реализация ситуационного управления в СМО состоит в автоматизации управляемого процесса диспетчеризации сроков и качества ремонта электродвигателей. Объектом управления в данном случае является СМО, для которой оптимизируется критерий (или группа критериев) качества ее функционирования за счет использования информации о текущем состоянии системы.

Подобное управление невозможно без применения вычислительной техники и для организации оптимального процесса функционирования СМО необходима разработка автоматизированной системы управления процессом массового обслуживания (АСУ ПМО) ремонтных заявок, которую можно отнести к классу АСУ дискретными технологическими процессами.

В настоящее время в агропромышленном комплексе сложилась оптимальная ситуация для широкого внедрения АСУ ПМО: существует, как было указано выше, острая потребность в подобной системе, имеются необходимые вычислительные средства для синтеза и реализации оптимальных процедур управления процессами массового обслуживания, накоплен определенный опыт проектирования и внедрения подобных систем.

Однако, несмотря на потребность сельского хозяйства в АСУ ПМО, позволяющих наиболее полно использовать ремонтные ресурсы, они пока не находят широкого практического применения в данной отрасли промышленности. Распространено мнение, что внедрение оптимальных управляемых дисциплин обслуживания во многих случаях нецелесообразно из-за трудоемкости их применения. Действительно, существующие математические методы, алгоритмические и программные средства синтеза оптимальных управляемых дисциплин обслуживания являются весьма неэффективными в отрасли агропромышленного производства, так как изначально они были разработаны для решения кардинально других вопросов и их адаптация под нужды сельского хозяйства приводит к большим материальным и временным затратам, которые подчас превышают выигрыш от использования оптимальных управляемых дисциплин обслуживания.

Все вышеизложенное позволяет заключить, что создание новой, эффективной и низко затратной в использовании системы управления процессом массового обслуживания в агропромышленном комплексе является актуальной научно-технической задачей.

Тогда, целью настоящей работы является совершенствование системы ППРиТО сельскохозяйственного электрооборудования путем исследования влияния различных способов управления процессом ремонта электродвигателей на экономическую эффективность их эксплуатации. При этом объектом исследования является процесс массового обслуживания электрооборудования на предприятиях АПК, а предмет исследования со-

стоит в разработке и внедрении новых способов анализа основных параметров системы массового обслуживания сельскохозяйственного электрооборудования, позволяющих определять эффективность различных вариантов его обслуживания в зависимости от объемов и сроков выделения денежных средств.

Рассмотрим более подробно вопрос оптимизации параметров функционирования СМО, направленной на отыскание такого их сочетания, при котором количество денежных средств, расходуемых на поддержание работоспособности электрооборудования в условиях сельскохозяйственного производства, будет минимальным.

Как известно, исходными данными для любого математического моделирования, лежащего в основе оптимизации, являются параметры, влияющие на исследуемый объект. Задача правильного выбора перечня параметров, входящих в модель, является одной из основных в системном анализе, так как игнорирование даже одного значимого параметра делает решаемую задачу оптимизации неразрешимой. Кроме того, все параметры должны быть управляемыми, т.е. должна существовать возможность задания любого требуемого значения параметра  $x$  внутренней области его определения и поддержки его на заданном уровне в ходе всего исследования. Более того, параметры должны быть независимыми, т.е. каждый из них должен определяться независимо от уровня других факторов [7].

При анализе процессов выхода из строя и ремонта электрических двигателей в сельском хозяйстве такими параметрами будут следующие:

- 1) интенсивность потока отказов электродвигателей (количество отказов в единицу времени);
- 2) интенсивность ремонта электродвигателей (количество ЭД, отремонтированных в единицу времени);
- 3) количество линий обслуживания (количество ремонтных бригад с соответствующим оборудованием, а также возможность агропромышленного предприятия ремонтировать одновременно некоторое количество двигателей на мощностях сторонних организаций);
- 4) количество электрических двигателей, используемых хозяйством;
- 5) стоимость ремонта каждого электродвигателя;
- 6) убытки от простоя производственных мощностей в результате выхода двигателей

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕМОНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

из строя за сутки;

7) прибыль, приносимая каждым двигателем в сутки.

Результатом решения математической модели является возможность оптимального управления данными параметрами, т.е. управления, обеспечивающего глобальный минимум функционала потерь и синтезируемого без каких-либо ограничений как на процесс функционирования СМО, так и на объем информации о ее текущем состоянии и поведении в прошлом.

Выполненный авторами анализ показал, что синтез оптимального управления для такой системы массового обслуживания, как агропромышленное предприятие, практически невозможен. Это связано с тем, что для полного описания фазового состояния системы необходимо указывать времена текущего обслуживания частично отремонтированных электродвигателей, интервалы времени с моментов последних отказов из рекуррентных потоков до момента наблюдения и времена текущего пребывания заявок в системе [7]. Данное обстоятельство приводит к появлению непрерывных компонентов в векторе текущего состояния СМО, следствием чего является бесконечное число состояний системы. Поэтому для данного случая удобнее решить задачу синтеза не оптимальной, а квазиоптимальной системы управления, наложив некоторые ограничения на процесс функционирования СМО и, тем самым, ограничив число состояний системы.

Специфика СМО в АПК самостоятельно накладывает ряд подобных ограничений:

1) количество электродвигателей и линий обслуживания в хозяйстве не может быть бесконечным;

2) при начале отсчета анализируемого периода можно пренебречь прошедшим временем обслуживания ранее вышедших из строя электродвигателей;

3) потоки выходов из строя и восстановления для данной системы можно считать пуассоновскими [7].

Как известно, по результатам диагностических мероприятий можно с некоторой вероятностью определить остаточный эксплуатационный ресурс электрического двигателя. Очевидно, что оптимальным сроком начала ремонта будет момент времени непосредственно перед выходом электродвигателя из строя, с учетом того, что в данный момент установка или не используется, или имеется резерв.

Обратимся к идеальному случаю, когда

число линий обслуживания не ограничено, и любой двигатель начинает ремонтироваться непосредственно после выхода из строя. В данном случае, интенсивность потока восстановления за некоторый расчетный период  $\lambda(t)_{cp}$  будет определяться из выражения

$$\lambda(t)_{cp} = \frac{N_{duae}(t) \cdot K_d + N_{внез}}{T_p}, \quad (1)$$

где  $N_{duae}(t)$  – число двигателей, которые должны выйти из строя за расчетный период по результатам диагностики;  $N_{внез}$  – число двигателей, внезапно вышедших из строя;  $K_d$  – погрешность результатов диагностических мероприятий;  $T_p$  – расчетный период.

Издержки от простоя оборудования, возникающие при внезапном выходе из строя электродвигателей, составят

$$C_{внез} = \sum_{i=1}^n C_{прості} \cdot T_{прості}, \quad (2)$$

где  $C_{прості}$  – издержки от простоя вышедшего из строя электродвигателя;  $T_{прості}$  – время простоя внезапно вышедшего из строя электродвигателя;  $n$  – количество внезапно вышедших из строя электродвигателей.

Данные издержки можно оценить только приблизительно, основываясь на том, что в среднем в год внезапно выходят из строя порядка 3 – 5 % двигателей.

Кроме того, необходимо учитывать издержки от простоя оборудования на период планового ремонта электродвигателей, который составляет в среднем два дня для большинства типов ЭД, и могут быть учтены по формуле

$$C_{рем} = \sum_{i=1}^k (C_{прості} \cdot 2), \quad (3)$$

где  $k$  – количество плановых ремонтов электрических двигателей.

Однако, в действительности, количество линий обслуживания не может быть равно количеству электродвигателей, так как это приведет к слишком большим затратам на их эксплуатацию. Тогда основной задачей является нахождение оптимального количества обслуживающих линий с точки зрения затрат на их содержание с одной стороны, и убытков от простоя оборудования с другой.

Количество линий обслуживания влияет на длительность простоя электродвигателей и зависит от объема выделенных денежных

средств. Для детального и полного описания данной зависимости необходимо выявить количественную закономерность между числом линий обслуживания и объемом необходимых для их функционирования денежных средств.

В зависимости от размера сельхозпредприятия и количества установленных ЭД каждое хозяйство выбирает один из наиболее приемлемых для него способов ремонта двигателей [6]:

1. создание собственной ремонтной базы (замкнутая система массового обслуживания);
2. ремонт электрических двигателей сторонней организацией (система с неограниченным потоком требований или разомкнутая СМО).

Первый способ является эффективным для крупных хозяйств с числом электродвигателей от 100 и более, и позволяет проводить ремонт двигателя в кратчайшие сроки с требуемым контролем технологического процесса.

Затраты при применении данного способа обслуживания формируются из следующих составляющих:

- 1) затраты на постройку и текущее обслуживание помещения для пункта технического обслуживания электродвигателей;
- 2) затраты на покупку и амортизацию ремонтного оборудования;
- 3) затраты на оплату труда персонала;
- 4) затраты на приобретение расходных материалов.

Как видно, данный способ ремонта требует значительных капитальных вложений на начальном этапе и не подходит для большинства мелких сельхозпредприятий, вынужденных прибегать ко второму способу ремонта ЭД, который имеет следующие недостатки:

- 1) более высокая, чем при первом способе, стоимость ремонта электродвигателей;
- 2) невозможность полного контроля технологического процесса, и, как следствие, возможное снижение показателей надежности отремонтированных электродвигателей;
- 3) большая продолжительность ремонта, обусловленная необходимостью доставки электрических двигателей в удаленный ремонтный центр.

Но, несмотря на все вышеперечисленные недостатки, данный способ ремонта электродвигателей нашел применение в более чем 95 % мелких и средних агропромышленных хозяйств и на более чем 30 % крупных сельхозпредприятий [8].

Кроме того, разомкнутая система отличается следующими особенностями функционирования:

- 1) ремонтная база состоит из ограниченного числа  $n$  ремонтных линий;
- 2) каждая ремонтная линия способна обслуживать одновременно только один двигатель;
- 3) каждый вновь вышедший из строя ЭД, застав все обслуживающие линии уже занятыми, становится в очередь и находится в ней до тех пор, пока одна из линий не освободится;
- 4) если вышедший из строя электродвигатель застает хотя бы одну свободную линию ремонта, то он сразу же принимается на обслуживание.

Функционирование данной системы рассматривается при условии поступления в нее пуассоновского потока ремонтных заявок. Поток требований неограничен по своим возможностям, однако его плотность  $\lambda$  имеет конечное значение. Время ремонта каждого электродвигателя  $t_{обс}$  является случайной величиной, которая подчиняется показательному закону распределения с параметром  $\mu$ . Все линии ремонта обладают одинаковой производительностью. Принципиальная схема системы представлена на рисунке 1.

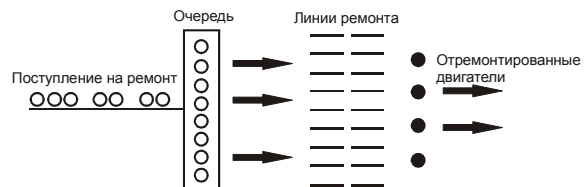


Рис. 1. Схема системы с неограниченным потоком требований

В качестве основных показателей работы рассматриваемой системы были взяты:

- 1) вероятность того, что все линии обслуживания свободны или заняты;
- 2) математическое ожидание длины очереди;
- 3) коэффициенты занятости или простоя линий обслуживания.

При замкнутой системе обслуживания отремонтированные электрические двигатели возвращаются в источник требований и дополняют его. Схематично работа такой системы представлена на рисунке 2.

Основные расчетные показатели системы аналогичны предыдущему случаю, однако при расчете необходимо учитывать то, что ряд двигателей в хозяйстве имеет приоритет

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕМОНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

в обслуживании, а также возможна взаимопомощь между ремонтными бригадами.

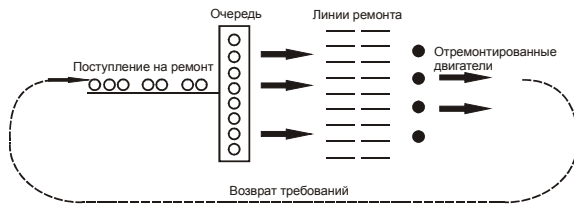


Рис. 2. Замкнутая система массового обслуживания

Тогда, при втором способе ремонта электрических двигателей количество линий обслуживания является прямым следствием объема имеющегося в данный период времени ремонтного фонда предприятия:

$$K_n(T) = \frac{V_\phi(T)}{S_\delta}, \quad (4)$$

где  $V_\phi(T)$  – объем ремонтного фонда предприятия на расчетный период времени, руб.;  $S_\delta$  – средняя стоимость ремонта одного электродвигателя, руб.

При расчете количества линий обслуживания в случае применения первого способа ремонта электродвигателей необходимо учесть следующее:

1) затраты на обслуживание здания ремонтного пункта, амортизационные отчисления на установленное оборудование, заработная плата персонала являются величинами постоянными и практически не зависят от количества ремонтируемых электродвигателей;

2) затраты на расходные материалы зависят от количества ремонтируемых в данный момент электродвигателей и определяют число линий обслуживания в течение расчетного периода времени.

Число линий обслуживания при данном способе ремонта электродвигателей определяется по выражению

$$K_n(T) = \frac{V_p(T)}{\sum S_{mat,i} + A + 3 \cdot N_{раб}}, \quad (5)$$

где  $V_p(T)$  – запас расходных материалов на расчетный период времени, руб.;  $S_{mat,i}$  – расход материалов на ремонт  $i$ -го электродвигателя, руб.;  $A$  – постоянные затраты на текущее обслуживание здания и амортизационные отчисления, руб.;  $3$  – заработная плата одного рабочего, руб.;  $N_{раб}$  – количество рабочих.

В свою очередь, число линий обслуживания при втором способе ремонта электрических двигателей можно рассчитать по формуле

$$K_n(T) = \frac{V_\delta(T)}{\sum V_{\delta e,i}}, \quad (6)$$

где  $V_\delta(T)$  – объем ремонтного фонда электрооборудования на расчетный период времени;  $V_{\delta e,i}$  – стоимость ремонта  $i$ -го электродвигателя.

При этом суммарные затраты на реализацию первого способа ремонта составят

$$W_1 = \sum_{i=1}^{N_{\delta e}(t)} S_{mat,i} + A + 3N_{раб} + \sum_{i=1}^{N_{\delta e}(t)} y_{прост,i} T_{прост,i}, \quad (7)$$

где  $N_{\delta e}(t)$  – количество вышедших из строя электродвигателей за расчетный период времени;  $y_{прост,i}$  – убытки от простоя  $i$ -го электродвигателя;  $T_{прост,i}$  – длительность простоя  $i$ -го электродвигателя.

А при втором способе ремонта суммарные затраты описываются формулой

$$W_2 = \sum_{i=1}^{N_{\delta e}(t)} S_{рем,i} + 3N_{раб} + \sum_{i=1}^{N_{\delta e}(t)} y_{прост,i} T_{прост,i}, \quad (8)$$

где  $S_{рем,i}$  – стоимость ремонта  $i$ -го электродвигателя.

Убытки от простоя оборудования имеют прямую зависимость от длительности ожидания ремонта. Длительность ожидания ремонта, в свою очередь, зависит от количества линий обслуживания. Таким образом, является возможность в формулах (7) и (8) выразить убытки от простоя через количество линий обслуживания.

Для решения задачи оптимизации показателей СМО, а также обоснования ее экономической эффективности был использован метод линейного программирования. Задачей линейного программирования в канонической форме является нахождение минимума линейных функций затрат на эксплуатацию парка электродвигателей при наличии или отсутствии собственной ремонтной базы [9].

Функция затрат, являющаяся целевой функцией оптимизации, при наличии собственной ремонтной базы принимает следующий вид:

$$G_{пн} = \left( \lambda q_{ож} + q_{пк} N_0 + \sum_{i=1}^{N_s} q_{ki} \right) t_{ож}, \quad (9)$$

где  $G_{пн}$  – величина затрат в системе за вре-

мя  $t_{ож}$ ;  $\square$  – количество простаивающих электродвигателей;  $q_{ож}$  – убытки, связанные с простаиванием одного электродвигателя в очереди в единицу времени;  $q_{пк}$  – стоимость единицы времени существования ремонтной линии СМО;  $N_0$  – количество ремонтных линий;  $q_{ki}$  – стоимость материалов на ремонт  $i$ -го электродвигателя;  $N_3$  – количество вышедших из строя электродвигателей.

В свою очередь, функция затрат при отсутствии собственной ремонтной базы может быть представлена следующим образом:

$$G_{по} = \left( \lambda q_{ож} + \sum_{i=1}^{N_3} q_{ki} \right) t_{ож}, \quad (10)$$

где  $G_{по}$  – величина затрат в системе за время  $t_{ож}$ ;  $q_{ki}$  – затраты на ремонт  $i$ -го электродвигателя.

При этом необходимо учитывать, что  $\lambda + N_3 = N$ , где  $N$  – суммарное количество электродвигателей.

Обозначим через  $S_p$  – численное решение задачи линейного программирования ( $P$ ), а через  $Arg(P)$  – множество решений задачи ( $P$ ), т.е. множество допустимых точек критериев, принадлежащих множеству  $R^n$  для которых  $S_p = G_{пн}$  или  $S_p = G_{по}$ .

Согласно теореме Минковского о том, что выпуклый компакт в  $R^n$  является выпуклой оболочкой своих крайних точек, число крайних точек множества  $D$ , задаваемого в виде конечного числа линейных равенств и неравенств, является конечным. Таким образом, для решения поставленной задачи линейного программирования достаточно перебрать значения функций  $G_{пн}$  и  $G_{по}$  во всех крайних точках множества  $D$ . Но нахождение всех этих крайних точек и перебор значений функций  $G_{пн}$  и  $G_{по}$  – довольно трудоемкая операция, поэтому вместо перебора был использован симплекс-метод, который для решения задач линейного программирования позволяет, начиная с некоторой исходной крайней точки, переходить к другой по направлению наибольшего убывания искомых функций.

Опуская промежуточные вычисления, приведем алгоритм применения разработанной при участии авторов методики оптимизации показателей СМО, представленный на рисунке 3.

На основании полученных результатов осуществим прогнозирование вероятности

безубыточной работы хозяйства, используя временную функцию выделения средств.

Выход из строя любого электродвигателя является причиной возникновения убытков, которые можно оценить следующим образом.



Рис. 3. Последовательность работы методики оптимизации параметров СМО

Вероятность того, что вышедший из строя двигатель будет ожидать ремонта больше некоторого времени  $t$  рассчитывается по формуле

$$P\{y > t\} = \prod e^{-(K_n(T)\beta - \lambda)t} \quad (t \geq 0). \quad (12)$$

Величина убытков в результате выхода из строя электрооборудования определяется из выражения

$$V_{уб}^* = \left( \sum_{i=1}^{n_e} C_{де} \right) \cdot (t_{ож} + t_{рем}) \quad (13)$$

где  $C_{де}$  – убытки от выхода из строя электродвигателя;  $t_{ож}$  – время ожидания ремонта;  $t_{рем}$  – время ремонта;  $n_e$  – количество электродвигателей, находящихся в ремонте.

Кроме того, в статью расходов необходимо включить затраты на ремонт электрооборудования  $V_{рем}$ . Тогда суммарные затраты  $V_{уб}$  можно рассчитать по формуле

$$V_{уб} = \left( \sum_{i=1}^{n_e} C_{де} \right) \cdot (t_{ож} + t_{рем}) + V_{рем} \quad (14)$$

В то же время, каждый работающий электродвигатель приносит некоторую прибыль  $W_{раб.i}$ . Математическое ожидание количества работающих электродвигателей определяется следующим образом:

$$M[X(t)] = \frac{a}{R(n, a)} \sum_{i=1}^n \frac{a^{i-1}}{(i-1)!} e^{-a} = \frac{aR(n-1, a)}{R(n, a)}, \quad (15)$$

где  $R(n, a)$  – распределение Пуассона.

Другими словами, число электрических двигателей, находящихся в эксплуатации в



## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕМОНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

стационарном режиме, при условии, что их общее число не может быть больше  $n$ , распределено по усеченному закону Пуассона с параметрами  $\alpha$  и  $n$ , где параметр  $\alpha$  равен отношению интенсивности потока ремонта ЭД в хозяйстве  $\lambda$  к интенсивности потока выхода из строя каждого электродвигателя  $\mu$ .

Тогда математическое ожидание объема прибыли в течение установленного периода времени рассчитывается по формуле

$$M[W] = \sum_{i=1}^{n_e} W_{\text{раб.}i} \cdot t_{\text{раб.}i} \quad (16)$$

где  $t_{\text{раб.}i}$  – время работы  $i$ -го электродвигателя в течение установленного периода времени.

Для соблюдения условия безубыточности работы необходимо, чтобы прибыль была больше убытков  $M[W] > V_{\text{уб}}$ , или

$$\sum_{i=1}^{n_e} W_{\text{раб.}i} \cdot t_{\text{раб.}i} > \left( \sum_{i=1}^{n_e} C_{\text{дв.}i} \right) \cdot (t_{\text{ож}} + t_{\text{рем}}) + V_{\text{рем}}$$

$$\text{откуда } t_{\text{ож}} < \frac{\sum_{i=1}^{n_e} W_{\text{раб.}i} \cdot t_{\text{раб.}i} - V_{\text{рем}}}{\sum_{i=1}^{n_e} C_{\text{дв.}i}} - t_{\text{рем}}$$

Вероятность того, что  $t_{\text{ож}}$  будет меньше расчетного времени  $t$  равна

$$P(t_{\text{ож}} < t) = 1 - \prod e^{-(K_n(T)\beta - \lambda)t}, \text{ и, соответс-}$$

$$P(t_{\text{ож}} < \frac{\sum_{i=1}^{n_e} W_{\text{раб.}i} \cdot t_{\text{раб.}i} - V_{\text{рем}}}{\sum_{i=1}^{n_e} C_{\text{дв.}i}} - t_{\text{рем}}) =$$

$$= 1 - \prod e^{-\left( (K_n(T)\beta - \lambda) \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_e} W_{\text{раб.}i} \cdot t_{\text{раб.}i} - V_{\text{рем}}}{\sum_{i=1}^{n_e} C_{\text{дв.}i}} - t_{\text{рем}} \right) \right)}$$

$$= 1 - \prod e^{-\left( (K_n(T)\beta - \lambda) \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_e} W_{\text{раб.}i} \cdot t_{\text{раб.}i} - V_{\text{рем}}}{\sum_{i=1}^{n_e} C_{\text{дв.}i}} - t_{\text{рем}} \right) \right)}$$

Условие

является условием безубыточной работы хозяйства, и, таким образом, вероятность

$$P_{\text{б.у.}} = 1 - \prod e^{-\left( (K_n(T)\beta - \lambda) \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_e} W_{\text{раб.}i} \cdot t_{\text{раб.}i} - V_{\text{рем}}}{\sum_{i=1}^{n_e} C_{\text{дв.}i}} - t_{\text{рем}} \right) \right)}$$

является вероятностью безубыточной работы хозяйства в заданных условиях.

Проиллюстрируем возможность практического применения полученных зависимостей на примере анализа ремонта парка электродвигателей КГУП «Центральный» Алтайского края.

Из таблицы 3 видно, что при 5 линиях обслуживания система может быстро прийти к насыщению, так как увеличение количества выходящих из строя электродвигателей с 20 до 25 и более повышает данную вероятность с 0,55 до 1 и не позволяет системе обслуживать электрооборудование данного хозяйства. В этом случае очередь ожидающих ремонта электродвигателей будет постоянно расти.

Таблица 3

Зависимость вероятности занятости всех линий обслуживания от их количества и интенсивности отказов электродвигателей

К <sub>л</sub> Т	Количество отказов электродвигателей, шт. / мес.					
	20	21	22	23	24	25
5	0,55	0,634	0,718	0,81	0,9	1
6	0,285	0,336	0,392	0,45	0,52	0,588
7	0,059	0,075	0,094	0,12	0,14	0,167
8	0,024	0,031	0,041	0,052	0,07	0,081
9	0,008	0,012	0,016	0,022	0,03	0,036
10	0,003	0,004	0,006	0,008	0,01	0,015

В результате использования методики оптимизации хозяйству рекомендовано перейти на 6 линий обслуживания, что увеличит ремонтные затраты на 20 %, однако, согласно (13) – (18) снизит убытки от простоя оборудования на 37 %. Итоговая экономия составит 17 %.

Дальнейшее увеличение количества линий обслуживания не приводит к росту экономичности работы хозяйства, так как уже при 7 линиях обслуживания выросшие на 40 % затраты на поддержание обслуживаемых линий сводят на нет экономический эффект от снижения убытков от простоя оборудования.

В среднем, данная методика позволяет



снизить затраты на эксплуатацию электрооборудования на 20 %, что подтверждается результатами статистики, собранной в КГУП «Центральный» Калманского района Алтайского края и комплексе предприятий ОАО «Русский хлеб».

В результате комплексного решения поставленных выше задач были получены:

1) математическая модель процесса эксплуатации электрооборудования, позволяющая установить взаимосвязь между различными сроками его ремонта и эффективностью работы всего технологического оборудования предприятия;

2) методика расчета потребностей агропромышленных предприятий в количестве обслуживающих линий при наличии или отсутствии собственной ремонтной базы;

3) способ расчета длительностей ремонтов различных с точки зрения приоритетности электродвигателей;

4) вероятностная модель определения коэффициентов загрузки оборудования и обслуживающего персонала для замкнутых систем массового обслуживания.

Использование разработанной математической модели и современных средств вычислительной техники дает возможность изучить динамику процессов массового обслуживания электрооборудования в сельском хозяйстве и определить параметры, влияющие на планирование его ремонта. Применение системы повышения эффективности процесса эксплуатации электрооборудования позволяет снять с человека большую часть трудоемкого процесса принятия решений при планировании его ремонта, и, тем самым, значительно увеличивает скорость и эффективность данного процесса.

Созданная методика оптимизации показателей процесса массового обслуживания дает возможность с учетом наличия или отсутствия собственной ремонтной базы планировать для сельскохозяйственного предприятия оптимальный график вывода электродвигателей в ремонт с точки зрения снижения суммарных затрат на проведение восстановительных мероприятий и убытков от простоя оборудования. Полученная инженерная методика практического применения усовершенствованной системы ППРиТО позволяет с учетом специфики и сезонности работы электродвигателей на предприятиях АПК разрабатывать рекомендации по объему и

срокам выполнения восстановительных мероприятий в каждом конкретном случае. Использование усовершенствованной системы ППРиТО, имеющей в своем составе разработанную методику планирования ремонтов электродвигателей, позволяет снизить затраты на их эксплуатацию в 1,2 раза.

Основные результаты работы, выполненной по гранту Президента Российской Федерации № МК-7964.2006.8, использованы и внедрены на объектах агропромышленного комплекса Алтайского края, а разработанная методика рекомендована к применению главным управлением сельского хозяйства администрации Алтайского края в качестве эффективной ресурсосберегающей технологии для предприятий АПК.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982.
2. Барзилович Е.Ю., каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М.: Советское радио, 1971.
3. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин, В.А. Заславский, И.А. Ушаков. – Киев: Наукова думка, 1993.
4. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. – М.: Советское радио, 1975.
5. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Изд-во «КомКнига», 2005.
6. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности. – М.: Советское радио, 1975.
7. Сильвестров Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний (основы расчета функциональных и надежностных характеристик стохастических систем). – М.: Советское радио, 1980.
8. Рыбаков В.А. Разработка методики планирования ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве на основе математического моделирования их жизненного цикла: дис.... канд. техн. наук. – Барнаул, 2007. – 168 с.
9. Рыбаков В.А., Хомутов С.О. Повышение эффективности эксплуатации электрооборудования путем использования автоматической системы планирования его ремонта [Текст] // Информационные технологии управления: Международный сборник трудов конференции. – С-Петербург: Изд-во Нева, 2005. – С. 127-128.