

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРИВОДА ВОДОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

## EXPERIMENTAL STUDY OF ENERGY-SAVING DRIVE OF LIQUID-PACKED RING VACUUM PUMP

**Ключевые слова:** вакуумпровод, вакуум-силовая установка, векторный преобразователь частоты, рабочая жидкость.

Приводится обоснование возможности энергосбережения при создании вакуума в доильной установке УДС-ЗБ. На основании проведенного анализа в экспериментальной лаборатории Великолукской ГСХА была создана экспериментальная установка для исследования энергосберегающего привода водокольцевого вакуумного насоса. В соответствии с проведенными исследованиями были обоснованы рациональные параметры вакуум-силовой установки, применяемой для доения коров на пастбищных комплексах. Возможность управления частотой вращения короткозамкнутых асинхронных электродвигателей была доказана сразу же после их изобретения. Реализовать эту возможность удалось лишь с появлением силовых полупроводниковых приборов – сначала тиристоров, а позднее транзисторов IGBT. Благодаря квадратичной характеристике U/F и возможности ее динамического выбора, преобразователь позволяет управлять насосом с наибольшей эффективностью, приближаясь к их естественной характеристике и тем самым сокращая потери энергии. Необходимо также более подробно отметить уже упоминавшуюся ранее функцию динамического выбора характеристики U/F. При снижении нагрузки на валу двигателя и, соответственно, уменьшении тока статора преобразователь снижает напряжение на статоре двигателя. На основании этого была разработана и собрана экспериментальная установка, состоящая из водокольцевого вакуумного насоса с приводом от трехфазного асинхронного электродвигателя переменного тока, преобразователя частоты OVEN 103-4K0-V, датчика-реле вакуумметрического давления ДРМ-Н-20, вакуумпровода с 8 кранами для подключения доильных аппаратов,

анализатора качества электроэнергии UMG 96 S. В результате проведения эксперимента были получены рациональные параметры вакуум-силовой установки для создания вакуума в доильной установке УДС-ЗБ на пастбищных комплексах.

**Keywords:** vacuum line, vacuum generator, vector frequency inverter, power fluid.

The possibility of energy saving at vacuum generation in the milking plant UDS-3B is studied. Based on the experimental laboratory study at the Velikolukskaya State Agricultural Academy the experimental plant to study the energy-saving drive of liquid-packed ring vacuum pump was assembled. The rational parameters of the vacuum generator used for milking cows on pastures were substantiated. The possibility to control the rotational speed of squirrel-cage induction motors was proved immediately after their invention. This feature was implemented with the advent of power semiconductor devices – first, thyristors, and later IGBT transistors. Due to its square-law characteristic U/F and its dynamic selection, the inverter enables controlling the pump with the highest efficiency thereby reducing energy loss. The function of the dynamic characteristic U/F selection should also be mentioned. When the load on the motor shaft is reduced and, accordingly, the stator current decreases, the inverter reduces the voltage on the motor stator. On this basis, the experimental plant was developed and assembled and included the following: a liquid-packed ring vacuum pump driven by a three phase asynchronous AC motor, frequency inverter OVEN 103-4K0-V, vacuum gage pressure relay-sensor DRM-N-20, vacuum lines with 8 locks for milking unit attachment, and electric power quality analyzer UMG 96S. The experiment enabled obtaining the rational parameters of the vacuum-generator for the milking plant UDS-3B in pasture facilities.

**Герасимова Ольга Александровна**, к.т.н., ст. преп., каф. «Механизация животноводства и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: olga-gerasimova@rambler.ru.

**Gerasimova Olga Aleksandrovna**, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Chair of Framing Mechanization and Electrical Power Use in Farming, Velikolukskaya State Agricultural Academy. E-mail: olga-gerasimova@rambler.ru.

**Введение**

Основной задачей экспериментальных исследований является определение возможности энергосбережения при работе доильной установки УДС-ЗБ на пастбищных комплексах. В соответствии с поставленной задачей экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Проблем энергосбережения в животноводстве» кафедры «Механи-

зация животноводства и применение электрической энергии в сельском хозяйстве» (МЖ и ПЭЭСХ) Великолукской ГСХА.

**Объекты и методы**

В качестве объекта исследований принята разработанная энергосберегающая установка для создания вакуума в вакуумпроводе.

Принимая во внимание требования, предъявляемые к работе водокольцевого вакуумного насоса [1], стандарт (ISO 1608-1:1993) и на основе анализа методик [2] испытания вакуум-силового агрегата, а также теоретических предпосылок была разработана программа исследований.

На основании программы исследований для проведения эксперимента была разработана и сконструирована экспериментальная конструктивно-технологическая вакуум-силовая установка с изменяющейся подачей насоса, в соответствии с требуемым расходом воздуха при доении за счет изменения частоты вращения ротора вакуумного насоса регулированием изменения частоты питающей сети, следовательно, частоты вращения ротора асинхронного двигателя, служащего приводом. Некоторые виды нагрузки имеют переменную механическую характеристику, для которой момент нагрузки возрастает с увеличением скорости вращения. Типичным примером устройств с такой нагрузкой являются центробежные насосы и вентиляторы, чья механическая характеристика описывается уравнением квадратичной параболы, а значит, потребляемая мощность пропорциональна кубу скорости вращения. Из этого следует, что даже небольшое снижение частоты вращения может дать значительный выигрыш в мощности, поэтому экономия электроэнергии является главным преимуществом использования управляемого электропривода. Теоретически снижение скорости на 10% дает 30% экономию мощности [3].

Технологическая схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Она состоит из водокольцевого вакуумного насоса с приводом от трехфазного асинхронного электродвигателя переменного тока, преобразователя частоты ОВЕН 103-4КО-В, датчика-реле вакуумметрического давления ДРМ-Н-20, вакуумпровода с 8 кранами для подключения доильных аппаратов, анализатора качества электроэнергии UMG 96 S.

В настоящее время во всем мире широко реализуется способ управления асинхронной машиной, который сегодня рассматривается не только с точки зрения экономии энергии, но и с точки зрения совершенствования управления технологическим процессом [3].

Наибольшее распространение получил ПЧ с промежуточным контуром постоянного тока, выполненный на базе инверторов напряжения. Структурная схема такого преобразователя приведена на рисунке 2.

Возможный экономический эффект от внедрения энергосберегающего автоматизированного привода водокольцевого вакуумного насоса складывается, в частности, из следующих факторов:

- экономия электроэнергии водокольцевым вакуумным насосом до 50% путем изменения частоты вращения; улучшение режимов работы насоса;
- снижение износа механических звеньев и увеличение срока службы технологического оборудования вследствие улучшения динамики работы электропривода;
- в режиме энергосбережения преобразователь частоты автоматически отслеживает потребление тока, рассчитывает нагрузку и снижает выходное напряжение, снижает потери на обмотках двигателя, и увеличивает его КПД.

На рисунке 3 приведен общий вид изготовленной экспериментальной установки на основании проведенного теоретического расчета [4], в состав которой введены необходимые элементы и узлы.

В экспериментальной установке был осуществлен автоматизированный привод водокольцевого вакуумного насоса с целью электросбережения при изменении вакуумметрического давления.

Электрическая часть установки включает в себя цепь управления асинхронным электродвигателем привода насоса, датчика (реле-давления), векторного преобразователя частоты и измерительных устройств (рис. 4). Привод насоса подключается к трехфазной сети переменного тока 380/220 В.

Векторный преобразователь частоты позволяет в автоматическом режиме изменять частоту вращения ротора асинхронного электродвигателя, следовательно, и частоту вращения рабочего колеса вакуумного насоса. Для измерения мощности, расходуемой водокольцевым вакуумным насосом, в схему установки были включены три трансформатора тока и анализатор качества электроэнергии UMG 96 S, представленный на рисунке 5 [5].

Экспериментальные исследования осуществлялись на установке, изображенной на рисунке 2, следующим образом.

В экспериментальной лаборатории было создано три вакуумпровода различного диаметра с восемью вакуумными кранами в каждом. Среди положительных характеристик труб из поливинилхлорида (ПВХ) особо выделяются следующие: разумная цена; устойчивость к образованию коррозии; устойчивость к воздействию различных химических веществ; огнеупорность – при возгорании трубы быстро затухают сами; ПВХ характеризуются низкой токсичностью; стойкостью к размножению и развитию бактерий внутри трубопровода; отличной пропускной способностью; низкой трудоемкостью работ по установке в связи с удобной конструкцией труб, небольшим весом изделий, что актуально, когда размеры и диаметры самих труб внушительны. Вероят-

ность механических повреждений во время доставки и установки также намного ниже, нежели при использовании других, более тяжелых труб; труба ПВХ очень экологична и не относится к канцерогенным строительным материалам; долговечность труб – срок эксплуатации, который оговаривают производители – 50 лет и более.

Для рабочей жидкости принята бочка емкостью 0,1 м<sup>3</sup>, в которой имелась возмож-

ность изменения температурного режима с помощью нагревательного элемента. К вакуумным кранам подключались восемь доильных аппаратов попарного действия. Доильные аппараты были надеты на имитатор вымени. Последний представляет собой устройство, в верхней части которого имелась емкость, а в нижней – четыре канала-соски по которым из емкости отсасывался имитатор молока (по аналогии с выменем коровы).

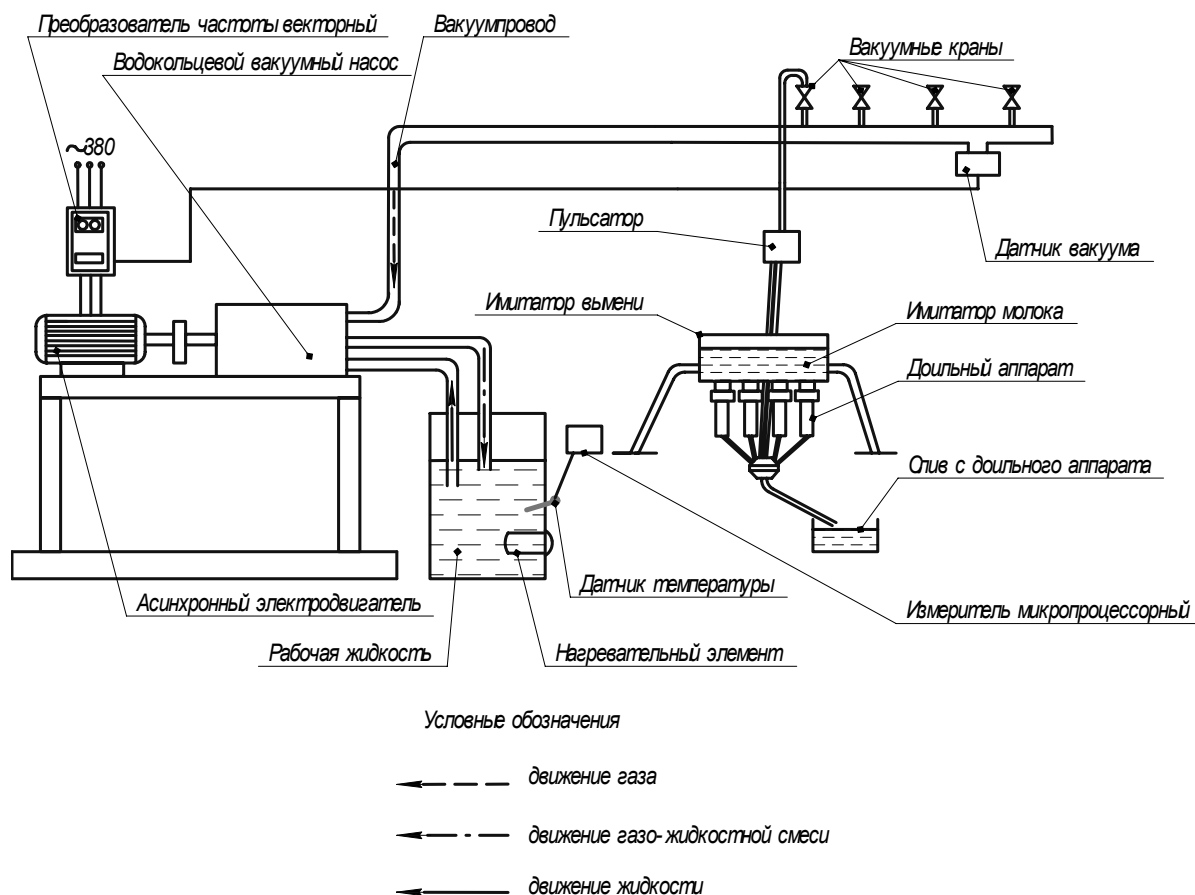


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки

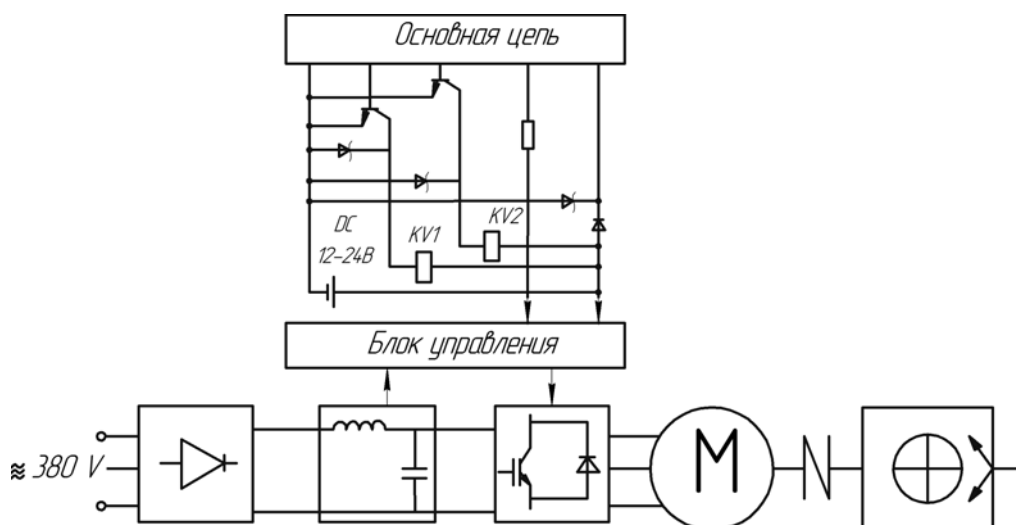
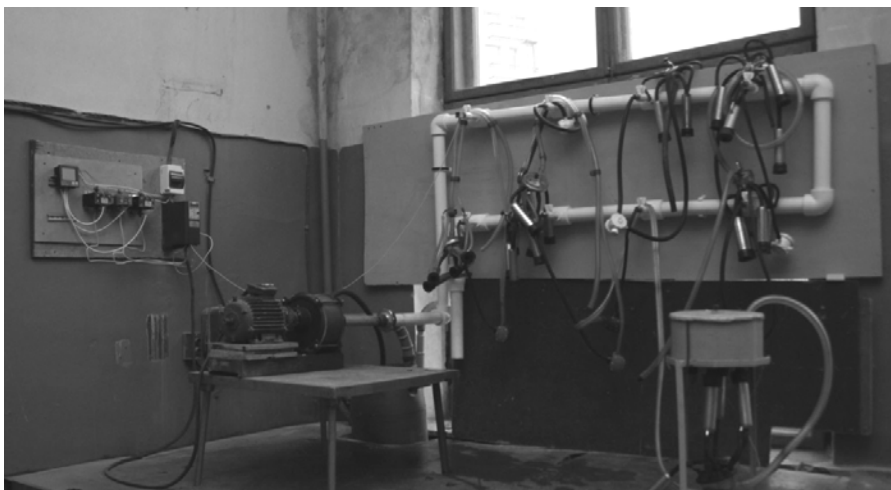
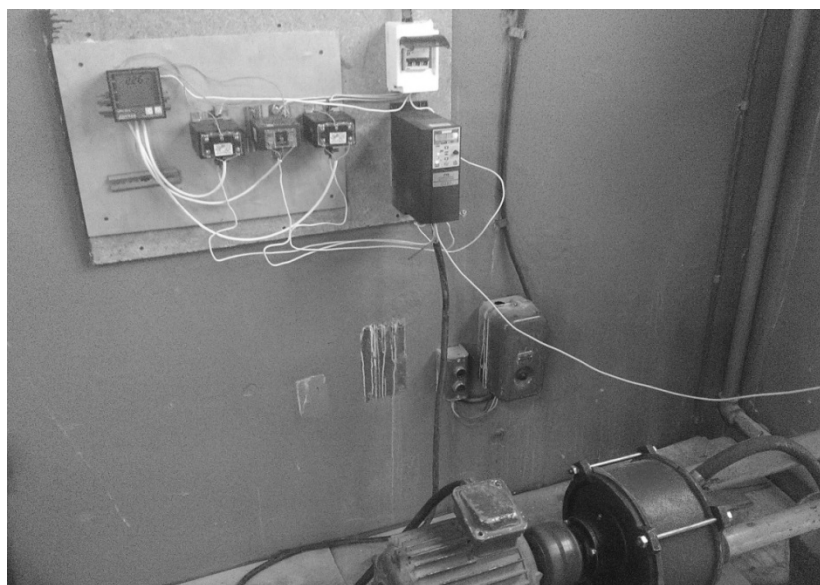


Рис. 2. Схема системы управления вакуумным насосом

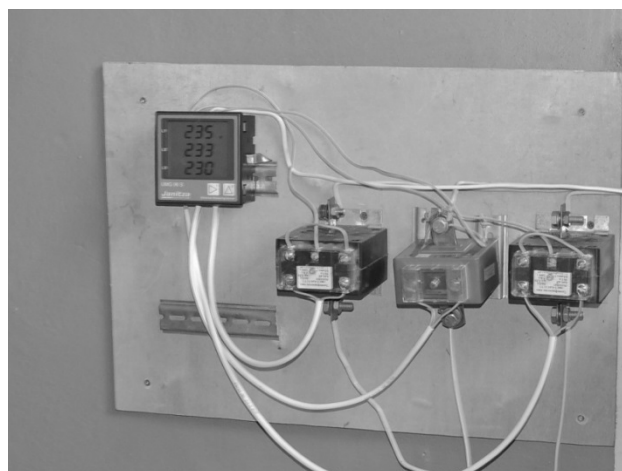


**Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки для исследования водокольцевого вакуумного насоса с набором доильных аппаратов**



**Рис. 4. Аппаратура управления водокольцевым вакуумным насосом**

Затем открывали определенное количество вакуумных кранов, включали водокольцевой вакуумный насос, который осуществлял движение имитатора молока в емкость для сбора. Вакуумметрическое давление контролировалось датчиком реле-давления. Установка работала в автоматическом режиме, т.е. при варьировании количества одновременно подключенных доильных аппаратов, изменялось давление в вакуум-проводе, на которое реагировал датчик (реле-давления) и изменял сигнал управления сети преобразователя частоты. Последний в свою очередь преобразовывал частоту тока электродвигателя привода вакуумного насоса, при снижении вакуума частота уменьшалась, а при увеличении – увеличивалась. При изменении частоты менялась частота вращения ротора асинхронного электродвигателя, соответственно, и ротора водокольцевого вакуумного насоса.



**Рис. 5. Схема установки прибора – анализатора качества электроэнергии UMG 96 S**

Для снятия заданных температурных характеристик был предусмотрен датчик со-

противления и микропроцессорный двухканальный измеритель 2ТРМО 5. Датчик измерял температуру рабочей жидкости.

В процессе работы водокольцевого вакуумного насоса производились замеры: мощности, затрачиваемой электродвигателем  $P_{дв}$ ; вакуумметрического давления  $P_{вак}$ ; температуры рабочей жидкости  $t_{рж}$ ; частоты питающей сети  $f_c$ .

В ходе планирования многофакторного эксперимента было отдано предпочтение трёхуровневым, ротабельным планам второго порядка Бокса – Бенкина, как более экономичным по числу опытов и позволяющим получить минимальную дисперсию коэффициентов регрессии математической модели и независимые оценки этих коэффициентов.

Анализ литературных источников [6] показывает, что количество одновременно подключенных аппаратов, внутренний диаметр вакуумпровода и температура рабочей жидкости являются основными факторами, влияющими на процесс работы водокольцевого вакуумного насоса.

Количество одновременно подключенных доильных аппаратов изменялось и составляло на разных опытах 2, 4 или 6 шт.

Внутренний диаметр вакуумпровода  $d_{вак}$ , м, – это фактор, от которого зависело качество создаваемого вакуума и затраты мощности на его создание [7], варьировался: 0,0408; 0,0514 или 0,0612 м.

Температура рабочей жидкости  $t_{рж}$ , °С, влияет на работу водокольцевого вакуумного насоса, её изменяли от 15 до 45°С (шаг 15°С).

Для обоснования области рационального сочетания перечисленных факторов необходима сравнительная оценка их на всех уровнях варьирования. При этом рандомизация опытов не производилась в целях экономии времени. Повторность проведения изменялась от 3 до 5 таким образом, чтобы относительная гарантированная ошибка не превышала 5%.

Экспериментальные исследования проводили при одновременном варьировании всех факторов, при этом для выявления характера воздействия отмеченных факторов на исследуемую нами величину в качестве математической модели была принята следующая зависимость:  $P_{дв} = f(n_{ит}; d_{вак}; t_{рж})$ .

### Результаты и их обсуждение

В ходе проведения эксперимента исследовались затраты мощности водокольцевого вакуумного насоса при различной нагрузке, но стабильном вакууме. Целью исследования являлось изучение возможности энергосбережения при работе вакуумной системы в автоматическом режиме.

Замер температуры рабочей жидкости проводили с микропроцессорного двухканального измерителя 2ТРМО с термометрами сопротивления.

При анализе поверхностей отклика, полученных с помощью программы «Statgraphics Plus» и построенных по полученной математической зависимости, следует отметить, что наибольшее влияние на мощность, затрачиваемую электродвигателем при работе водокольцевого насоса ( $P_{пр}$ ), оказывают количество одновременно подключенных доильных аппаратов и диаметр вакуумпровода (рис. 6).

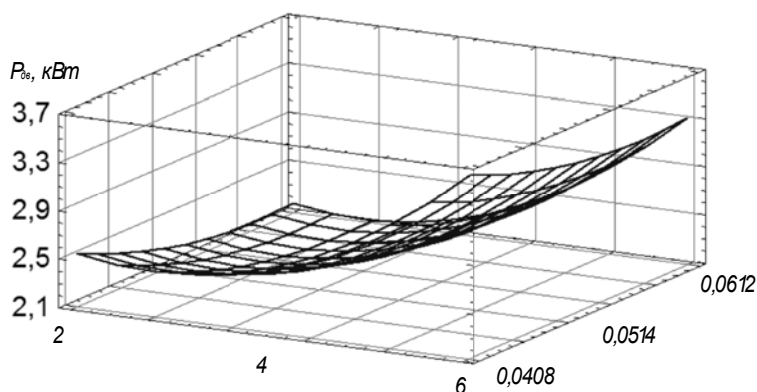


Рис. 6. Зависимость мощности, затрачиваемой электродвигателем при работе водокольцевого насоса, от количества одновременно подключенных доильных аппаратов и внутреннего диаметра вакуумпровода

Выявлено, что при одновременном подключении доильных аппаратов от 6 до 2 происходит снижение мощности, затрачиваемой электродвигателем при работе водокольцевого насоса до 2,23 кВт. Минимальные значения мощности достигаются при значении наибольшем внутреннем диаметре вакуумпровода. После раскодирования факторов модель объекта в физических величинах принимает вид:

$$P_{\text{ов}} = 2,33 + 0,55 n_{\text{ан}} - 0,165 d_{\text{вак}} + 0,1763 t_{\text{рж}} + \\ + 0,0175 n_{\text{ан}} \cdot d_{\text{вак}} - 0,4417 n_{\text{ан}}^2 + 0,1342 d_{\text{вак}}^2 + \\ + 0,0617 t_{\text{рж}}^2.$$

Полученная математическая модель процесса создания вакуума позволила определить рациональные значения входящих факторов:  $t_{\text{рж}}$  – температура рабочей жидкости – 20-25°C;  $d_{\text{вак}}$  – диаметр вакуумпровода – 0,0614 м.

#### Заключение

Создана экспериментальная установка для исследования водокольцевого вакуумного насоса и определены её оптимальные конструктивные и технологические параметры, а также режимы работы; разработана математическая модель работы водокольцевого вакуумного насоса при различной нагрузке на основе использования методики планирования трехфакторного эксперимента.

#### Библиографический список

1. Цой Ю.А., Мишуров Н.П., Кирсанов В.В., Зеленцов А.И. Тенденции развития доильного оборудования за рубежом. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2000. – 76 с.
2. Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. – М.: Колос, 1994. – 169 с.
3. <http://www.agrovodcom.ru>.
4. Шилин В.А., Герасимова О.А. Теоретическое обоснование параметров и режимов работы водокольцевого вакуумного насоса // Вестник ВНИИМЖ: ежекварт. науч. журн. – 2014. – № 4. – С. 70-76.
5. Вакуумный режим в молокопроводе модернизированных доильных установок / В.Н. Шулятьев, И.Г. Конопельцев, А.А. Рылов, С.В. Сурков // Совершенствование технологий и средств механизации производства продуктов растениеводства и животно-

водства: матер. науч.-практ. конф. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2007. – С. 104-107.

6. Шилин В.А., Герасимова О.А. Энергосберегающая система с частотно-регулируемым приводом для пастбищных комплексов // Вестник ВНИИМЖ: ежекварт. науч. журн. – 2012. – № 4 – С. 136-143.

7. Шилин В.А. и др. Теоретические исследования работы водокольцевого вакуумного насоса / [Электронный ресурс] // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электр. период. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – № 1(17). – 17 с. – Режим доступа: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec162-field6.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec162-field6.pdf).

#### References

1. Tsoi Yu.A., Mishurov N.P., Kirsanov V.V., Zelentsov A.I. Tendentsii razvitiya doil'nogo oborudovaniya za rubezhom. – M.: FGNU «Rosinformagrotekh», 2000. – 76 s.
2. Khailis G.A., Kovalev M.M. Issledovaniya sel'skokhozyaistvennoi tekhniki i obrabotka opytnykh dannykh. – M.: Kolos, 1994. – 169 s.
3. <http://www.agrovodcom.ru>.
4. Shilin V.A., Gerasimova O.A. Teoreticheskoe obosnovanie parametrov i rezhimov raboty vodokol'tseвого vakuumnogo nasosa // Vestnik VNIIMZh: ezhekvart. nauch. zhurn. – 2014. – № 4. – S. 70-76.
5. Vakuumnyi rezhim v molokoprovode modernizirovannykh doil'nykh ustanovok / V.N. Shulyat'ev, I.G. Konopel'tsev, A.A. Rylov, S.V. Surkov // Sovershenstvovanie tekhnologii i sredstv mekhanizatsii proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva: mater. nauch.-prakt. konf. – Kirov: NIISKh Severo-Vostoka, 2007. – S. 104-107.
6. Shilin V.A., Gerasimova O.A. Energoberegayushchaya sistema s chastotno-reguliruemym privodom dlya pastbishchnykh kompleksov // Vestnik VNIIMZh: ezhekvart. nauch. zhurn. – 2012. – № 4 – S. 136-143.
7. Teoreticheskie issledovaniya raboty vodokol'tseвого vakuumnogo nasosa / Shilin V.A. i dr. [Elektronnyi resurs] // Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii: elektron. periodich. izd. / Ros. nauch.-issled. in-t problem melioratsii. – Elektron. zhurn. – Novocherkassk: RosNIIPM, 2015. – № 1 (17). – 17 s. – Rezhim dostupa: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec162-field6.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec162-field6.pdf).

