

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА, ПОДКЛЮЧЕННОГО ОДНОВРЕМЕННО
К ИСТОЧНИКАМ ЭДС И ТОКА

А.А. Kirilin, D.M. Olin,
N.M. Popov, A.V. Smirnov

A STUDY OF THE TRANSFORMER SIMULTANEOUSLY CONNECTED TO THE SOURCES
OF EMF AND CURRENT

Кирилин А.А. – ст. преп. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Олин Д.М. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Попов Н.М. – д-р техн. наук, проф. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Смирнов А.В. – асп. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, п. Караваево. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Kirilin A.A. – Senior Lecturer, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, S. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Olin D.M. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, S. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Popov N.M. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, S. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Smirnov A.V. – Post-Graduate Student, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, S. Karavaevo. E-mail: A.A.Kirilin@yandex.ru

Отношение токов в трансформаторе, первичной обмоткой подключенного к источнику ЭДС, а вторичной – к источнику тока, не равно коэффициенту трансформации. Ток в первичной обмотке при увеличении тока во вторичной может как увеличиваться, так и уменьшаться. Такой эффект обусловлен сдвигом фаз токов на угол $0-360^\circ$ в отличие от сдвига на угол $-90...+90^\circ$ при подключении емкостной или индуктивной нагрузки ко вторичной обмотке. Созданные этими токами магнитные потоки в сердечнике трансформатора имеют либо встречное направление, уменьшая суммарный магнитный поток, либо согласное – увеличивая его. С целью изучения такого режима работы трансформатора проведено экспериментальное исследование, цель которого – получение уравнения, описывающего связь токов в первичной и вторичной обмотке при изменении угла сдвига фаз токов. Объектом исследования был однофазный двухобмоточный трансформатор. Факторами выбраны мощность трансформатора, напряжение, подведенное к первичной обмотке, модуль и фаза тока во вторичной обмотке. Для исследования составлена принципиальная схема, позволяющая при помощи только активных сопротивлений

задавать разный по модулю и фазе ток во вторичной обмотке, разработана методика. Результаты обрабатывались в программе STATGRAPHICS Plus. Составлено уравнение регрессии, определены его коэффициенты. По итогам анализа поверхности отклика, построенной с использованием уравнения, сделан вывод: ток в первичной обмотке в большей степени зависит от модуля и угла сдвига фазы тока, протекающего по вторичной обмотке трансформатора, а также от напряжения, поданного на первичную обмотку, мощность трансформатора оказывает влияние в меньшей степени.

Ключевые слова: однофазный трансформатор, зависимость тока в первичной и вторичной обмотке.

The ratio of currents in the transformer, the primary winding connected to the EMF source, and the secondary to the current source, is not equal to the transformation coefficient. The current in the primary winding, with an increase in the current in the secondary, can both increase and decrease. This effect is due to the phase shift of the currents at the angle of $0-360$ in contrast to the angle shift $-90...+90$ when connecting capac-

itive or inductive load to the secondary winding. The magnetic fluxes created by these currents in the core of the transformer have either an opposite direction, reducing the total magnetic flux, or a consonant one – increasing it. For the purpose of studying such operating mode of the transformer the pilot study, which purpose was receiving the equation describing communication of currents in primary and secondary winding at change of the corner of shift of phases of currents was conducted. The object of the study was a single-phase two-winding transformer. Transformer power, tension brought to primary winding, the module and the phase of current in a secondary winding are chosen as factors. To study composed concept, which allows using only active resistance can set different the module and the phase of the current in the secondary winding, the developed method. The results were processed in the programme STATGRAPHICS Plus. The regression equation was compiled, its coefficients were determined. Following the results of the analysis of the surface of the response constructed with using the equation the conclusion was drawn that current in primary winding depended more on the module and the corner of shift of the phase of the current proceeding on secondary winding of the transformer and also on the tension given on primary winding, the power of the transformer had the impact to lesser extent.

Keywords: single-phase transformer, dependence of current in primary and secondary winding.

Введение. Согласно разработанному способу [1], предназначенному для передачи сигналов управления по силовой сети на промышленной частоте, однофазный трансформатор включается первичной обмоткой на фазное или линейное напряжение, а вторичной – в рассечку нулевого провода. Возникающие изменения напряжения при этом в сети описаны в работах [2, 3]. Ток, протекающий во вторичной обмотке трансформатора, будет зависеть от тока в нулевом проводе. Заменим схему включения трансформатора, описанную в [1] схемой, в которой первичная обмотка подключается к источнику ЭДС, а вторичная – к источнику тока (рис. 1). В таком режиме работы трансформатора увеличение тока во вторичной обмотке не всегда будет вызывать увеличение тока в первичной обмотке трансформатора. Поэтому для обоснованного выбора мощности трансформатора в [1] проведено исследование влияния сдвига фазы тока во вторичной обмотке на ток в первичной обмотке.

Результирующий магнитный поток, являясь суммой магнитных потоков обмоток, влияет на ток в первичной обмотке, увеличивая его или уменьшая. Степень влияния при этом зависит от модуля и угла сдвига обоих магнитных потоков, а изменения тока в первичной обмотке не поддаются оценке при помощи коэффициента трансформации.

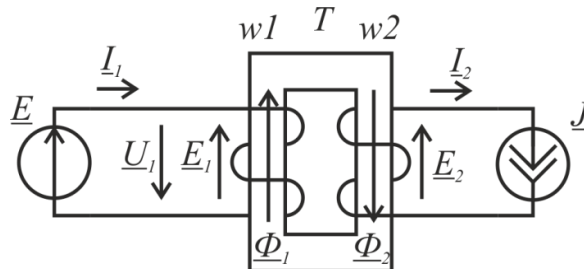


Рис. 1. Схема замещения трансформатора

Суммарный магнитный поток можно найти по закону Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \frac{I_1 \cdot w_1}{R_\mu} + \frac{I_2 \cdot w_2}{R_\mu},$$

где w_1 , w_2 – число витков первичной и вторичной обмотки; R_μ – магнитное сопротивление магнитопровода.

Число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора отличается на коэффициент трансформации (k_T):

$$\Phi = \frac{I_1 \cdot w_2 \cdot k_T}{R_\mu} + \frac{I_2 \cdot w_2}{R_\mu}.$$

Проведя преобразования и учтя угол сдвига фаз тока вторичной обмотки (φ), получаем

$$\Phi = (I_1 \cdot k_T + I_2 \cdot e^{j\varphi}) \cdot \frac{w_2}{R_\mu}.$$

Угол φ под действием тока от источника J может изменять свое значение в пределах $0-360^\circ$ в отличие от изменений в пределах $-90...+90^\circ$, вызванных

емкостной или индуктивной нагрузкой при стандартной схеме включения. Для изучения работы трансформатора при такой схеме включения (см. рис. 1) проведено исследование.

Цель исследования: изучение влияния сдвига фазы тока во вторичной обмотке на ток в первичной обмотке и получение зависимости тока в первичной обмотке трансформатора от тока во вторичной обмотке.

Объект исследования: однофазный двухобмоточный трансформатор.

Предмет исследования: взаимосвязь параметров режима работы трансформатора.

Методика исследования. В качестве зависимой переменной выбран модуль тока в первичной обмотке (I_1), найденный из уравнения

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{E}_1,$$

где $\underline{E}_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi$.

$$I_1 = \left| \frac{-4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \underline{I}_2 \cdot e^{j\varphi} \cdot w_2 + \underline{U}_1 \cdot R_\mu}{\underline{Z}_1 \cdot R_\mu + 4,44 \cdot w_1^2 \cdot f} \right|.$$

Величины w_1 , w_2 , $\underline{Z}_1$, R_μ зависят от конструктивных параметров трансформатора и в том числе от мощности трансформатора. Частота f постоянна и

равна 50 Гц. Поэтому для исследования принята статическая модель вида

$$Y = F(X_1, X_2, X_3, X_4).$$

Определены независимые переменные (факторы):

X_1 – действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора ($\underline{I}_2$), варьировалось на уровнях: 6,6; 4,2; 2,4 А;

X_2 – угол сдвига фаз тока во вторичной обмотке и напряжения, поданного на первичную обмотку трансформатора (φ), варьировался на уровнях: 120; 0; -120°;

X_3 – действующее значение напряжения, поданного на первичную обмотку трансформатора ($\underline{U}_1$), варьировалось на уровнях: 150; 200; 250 В;

X_4 – мощность трансформатора (S), варьировалась на уровнях: 100; 250; 400 ВА.

Мощность трансформатора можно изменить, только подключив другой трансформатор, поэтому проведено три эксперимента по трехуровневой трехфакторной матрице планирования (план Бокса-Бенкина) для трансформаторов разной мощности. Разработанная схема исследования трансформатора представлена на рисунке 2.

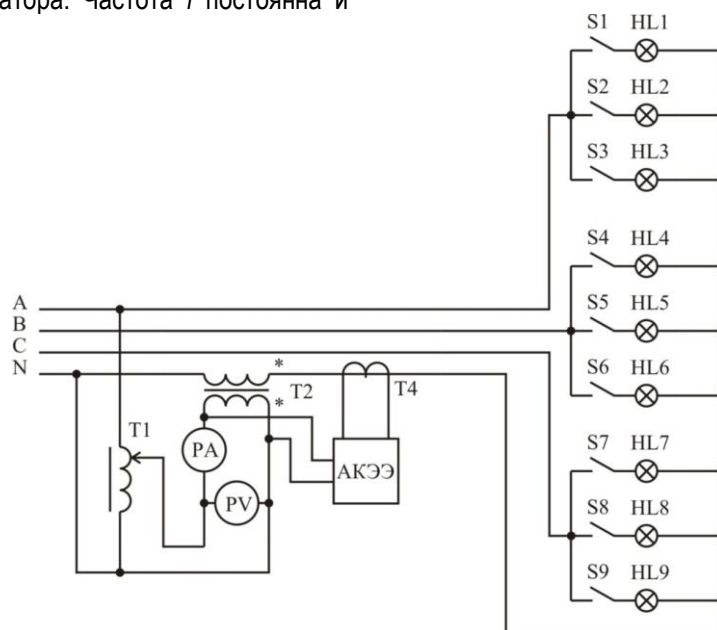


Рис. 2. Принципиальная схема для исследования трансформатора при подключении к первичной обмотке источника ЭДС, а ко вторичной – источника тока

На рисунке 2 АКЭЭ – анализатор качества электрической энергии, Т2 – исследуемый трансформатор. После выполнения опытов по матрице планирования для трансформатора мощностью 100 ВА подключались поочередно трансформаторы мощностью 250 и 400 ВА. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории релейной защиты Костромской ГСХА.

Для оценки качества проведенных опытов были рассчитаны основные статистические характеристики

ки по методике, приведенной в [4]. Относительная гарантированная ошибка не превысила 4,6 %, что указывает на хорошую повторяемость опытов.

Результаты исследования. Уравнение регрессии получено при помощи пакета по статическому анализу и обработке данных STATGRAPHICS Plus:

$$I_1 = -0,000473 + 0,031 \cdot I_2 - 0,00000756 \cdot S + 0,000061 \cdot U_1 - 0,0237 \cdot \sin(\varphi_2) + 0,000102 \cdot (I_2)^2 - 0,00158 \cdot \sin(\varphi_2) \cdot I_2.$$

В результате регрессионного анализа установлено, что полученная модель информационно способна, коэффициент детерминации $R^2 = 93,7 \%$ показывает, что модель объясняет вариабельности переменной I_1 на всем диапазоне. Скорректированный коэффициент детерминации равен $R^2 = 93 \%$. В регрессионном анализе модель считается работоспособной, если коэффициент детерминации $R^2 \geq 75 \%$.

Заметной корреляции между опытными значениями, размещенными в матрице, нет, так как Durbin-Watson статистика $DW = 1,3$. Полученное уравнение может быть использовано для прогнозирования новых наблюдений.

Оценка влияния входных параметров на ток в первичной обмотке трансформатора проведена по итогам анализа построенных поверхностей отклика (рис. 3, 4).

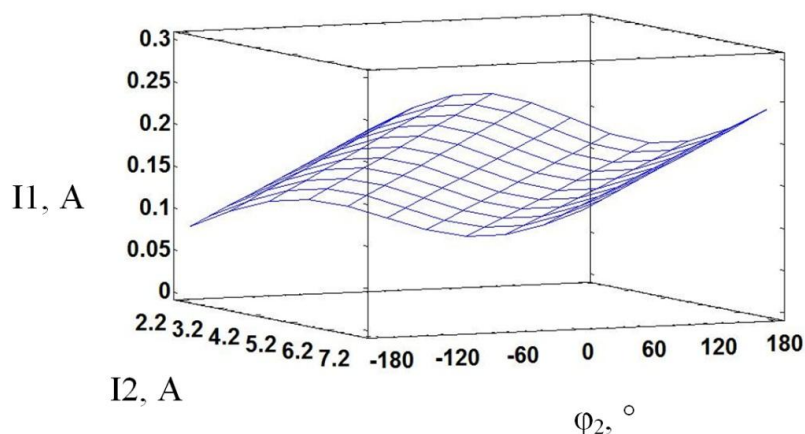


Рис. 3. Влияние тока и фазы тока во вторичной обмотке трансформатора на ток в первичной обмотке

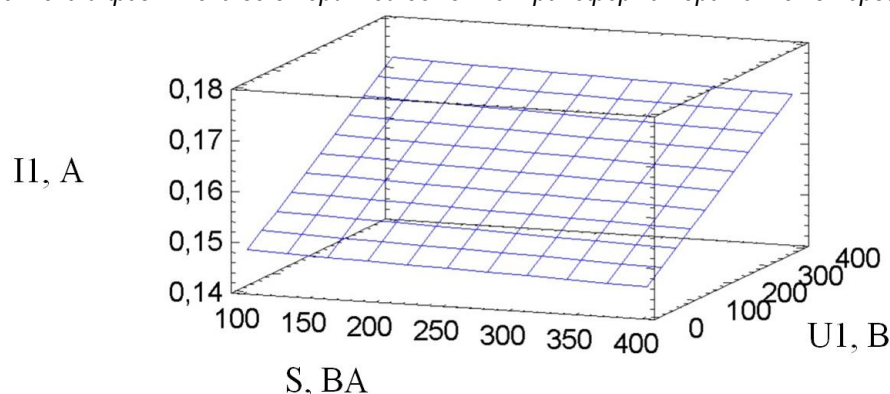


Рис. 4. Влияние мощности трансформатора и напряжения, поданного на первичную обмотку трансформатора, на ток в первичной обмотке

Исходя из величины значений коэффициентов полученной математической модели и результатов анализа поверхности отклика, сделаны выводы:

– исследуемая величина в большей степени зависит от значения и угла сдвига фазы тока, проте-

кающего по вторичной обмотке трансформатора, а также от напряжения, поданного на первичную обмотку;

– мощность трансформатора оказывает влияние в меньшей степени.

На рисунке 5 представлена номограмма, позволяющая определить ток в первичной обмотке при изменении значения и угла сдвига фазы тока во вторичной обмотке трансформатора марки ОСМ-0,4УЗ и при номинальном напряжении $U_1 = 380$ В.

Из номограммы видно, что для работы трансформатора в описанном режиме ток во вторичной обмотке не должен превышать 28 А, что в 0,84 раза меньше 33,3 А – номинального тока вторичной обмотки.

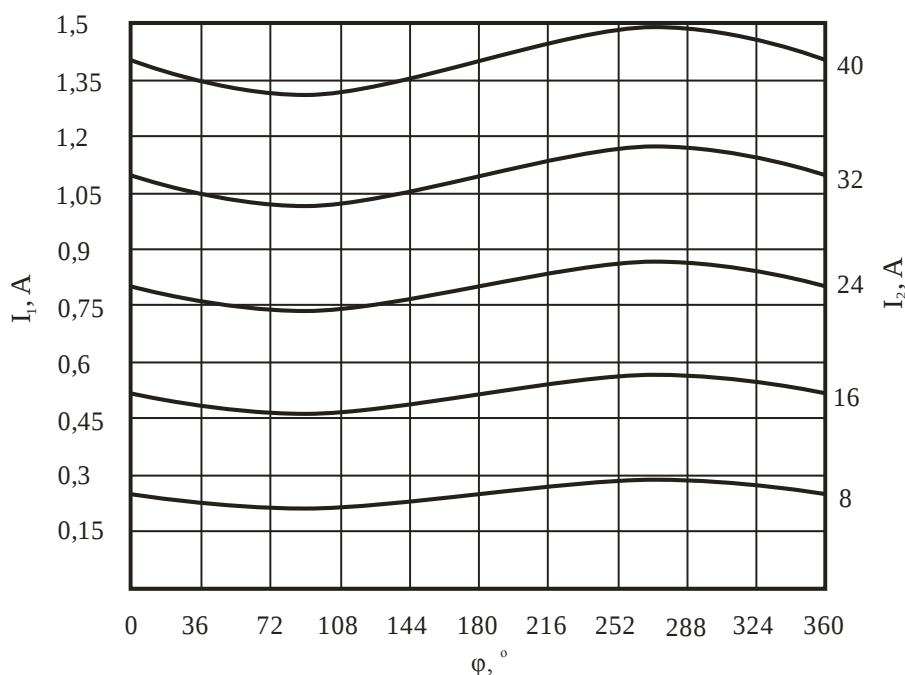


Рис. 5. Номограмма зависимости тока в первичной обмотке трансформатора ОСМ-0,4УЗ от значения и угла сдвига фазы тока во вторичной обмотке при номинальном напряжении первичной обмотки

Выводы

1. Описан режим работы трансформатора, при котором сдвиг фазы тока во вторичной обмотке относительно ЭДС вторичной обмотки изменяется от 0 до 360 градусов;

2. Разработана схема и методика исследования трансформатора, позволяющая первичную обмотку трансформатора подключить к источнику ЭДС, а вторичную – к источнику тока и создавать сдвиг фазы тока во вторичной обмотке относительно ЭДС вторичной обмотки от 0 до 360 градусов.

3. По экспериментальным данным найдено уравнение и рассчитаны его коэффициенты, описывающие изменение тока в первичной обмотке трансформатора при изменении значения и угла сдвига фаз тока во вторичной обмотке, напряжения поданного на первичную обмотку для трансформаторов разной мощности.

4. По полученному уравнению построена номограмма, позволяющая определить ток в первичной обмотке при изменении значения и угла сдвига фазы тока во вторичной обмотке трансформатора марки ОСМ-0,4УЗ и при номинальном напряжении $U_1 = 380$ В.

5. Для работы трансформатора ОСМ-0,4УЗ в описанном режиме ток во вторичной обмотке не

должен превышать 28 А, что в 0,84 раза меньше 33,3 А – номинального тока вторичной обмотки при подаче на первичную обмотку номинального напряжения.

Литература

1. Пат. № 2601875 Российская Федерация, МПК H02J13/00. Способ управления электропотребителями по силовой сети / Попов Н.М., Кирилин А.А., Олин Д.М.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия». – № 2015107405; заявл. 03.03.2015; опубл. 17.10.2016, Бюл. № 31.
2. Кирилин А.А., Попов Н.М., Олин Д.М. Способ передачи сигналов по сельским распределительным сетям 0,38 кВ // Вестн. КрасГАУ. – 2017. – № 2 (125). – С. 88–97.
3. Кирилин А.А., Попов Н.М., Олин Д.М. Изменение напряжения нулевой последовательности при передаче сигналов по силовой сети 0,38 кВ // Вестн. КрасГАУ. – 2017. – № 11 (134). – С. 118–124.
4. Основные понятия о математическом планировании многофакторных экспериментов, обра-

ботке экспериментальных данных и случайных процессах / сост. М.С. Волхонов, С.Ю. Зудин, И.Б. Зимин [и др.]. – Кострома: Изд-во КГСХА, 2011. – 80 с.

Literatura

1. Pat. № 2601875 Rossijskaja Federacija, MPK H02J13/00. Sposob upravlenija jelektropotrebiteľjami po silovoj seti / Popov N.M., Kirilin A.A., Olin D.M.; zaja vitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Kostromskaja gosudarstvennaja sel'skhozajstvennaja akademija». – № 2015107405; zaja vl. 03.03.2015; opubl. 17.10.2016, Bjul. № 31.
2. Kirilin A.A., Popov N.M., Olin D.M. Sposob peredachi signalov po sel'skim raspredelitel'nyh setjam 0,38 kV // Vestn. KrasGAU. – 2017. – № 2 (125). – S. 88–97.
3. Kirilin A.A., Popov N.M., Olin D.M. Izmenenie naprazhenija nulevoj posledovatel'nosti pri peredache signalov po silovoj seti 0,38 kV // Vestn. KrasGAU. – 2017. – № 11 (134). – S. 118–124.
4. Osnovnye ponjatija o matematicheskom planirovanii mnogofaktornyh jeksperimentov, obrabotke jeksperimental'nyh dannyh i sluchajnyh processah / sost. M.S. Volhonov, S.Ju. Zudin, I.B. Zimin [i dr.]. – Kostroma: Izd-vo KGSXA, 2011. – 80 s.

УДК:631.365.22

С.Д. Шепелев, Д.О. Внуков,
И.Н. Кравченко

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

S.D. Shepelev, D.O. Vnukov,
I.N. Kravchenko

THE METHOD OF JUSTIFICATION OF GRAIN DRYING EQUIPMENT PRODUCTIVITY

Шепелев С.Д. – д-р техн. наук, доц., проректор по учебной работе, директор Института агроинженерии Южно-Уральского государственного аграрного университета, г. Челябинск. E-mail: shepelev2@yandex.ru

Внуков Д.О. – асп. каф. эксплуатации машинно-тракторного парка Южно-Уральского государственного аграрного университета, г. Челябинск. E-mail: dmit.vnukoff@yandex.ru

Кравченко И.Н. – канд. техн. наук, директор по развитию АО «Агропромышленное объединение «МУЗА»», Курганская обл., Щучанский р-н, г. Щучье. E-mail: dmit.vnukoff@yandex.ru

Shepelev S.D. – Dr. Techn. Sci., Assoc. Prof., Vice Rector for Study, Director, Institute of Agroengineering, Southern Ural State Agrarian University, Chelyabinsk. E-mail: shepelev2@yandex.ru

Vnukov D.O. – Post-Graduate Student, Chair of Machine and Tractor Park Operation, Southern Ural State Agrarian University, Chelyabinsk. E-mail: dmit.vnukoff@yandex.ru

Kravchenko I.N. – Cand. Techn. Sci., Director in Development, JSC «Agro-Industrial Association «MUZA», Kurgan Region, Shchuchansky District, Shchusye. E-mail: dmit.vnukoff@yandex.ru

Цель исследования – повышение эффективности механизированных процессов в растениеводстве согласованием параметров зерноуборочных и сушильных комплексов. Задачи исследования: 1) провести анализ функционирования механизированного процесса уборки и сушки зерновых культур, обосновать пути повышения их эффективности на основе согласованности эксплуатационно-технологических параметров; 2) установить взаимосвязь производительности зерноуборочных и зерносушильных комплексов; 3) подтвердить теоретические исследования в производственных условиях. Исследованиями установлено, что на рациональную производительность сушильного

комплекса влияет техническое оснащение зерноуборочного процесса, надежность зерноуборочной техники, стоимость производимой продукции с гектара и другие производственные факторы. Нарушение агротехнических сроков под воздействием влияния климатических условий на производственный процесс уборки зерновых культур приводит к значительным потерям продукции и снижению прибыли производства. Для повышения эффективности функционирования технологической линии на основе экономико-математического моделирования обоснована производительность зерносушильного оборудования в зависимости от количества комбайнов, их уровня эксплуатации,