

batyvayushchey mashiny na kachestvennye pokazateli ee raboty // Agrotehnika i energoobespechenie. – 2018. – № 2 (19). – S. 101-116.

15. Soshalskiy P.N. Provolochnyy paroochistitel. – Poltava, 1926. – S. 15.

16. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N., Khramov N.S. Fizicheskaya sushchnost protsessa vzaimodeystviya s pochvoy rabocheho organa s gibkim elementom // Selskoe khozyaystvo. – 2017. – №. 3. – S. 33-42. DOI: 10.7256/2453-8809.2017.3.24563.

17. Siromyatnikov Yu.M. Vdoskonalennyya robochikh organiv dlya pidrizannya ta pidyomu grunturozrikhlyvalno-separuyuchoyu mashinoyu // Inzheneriya prirodokoristuvannya. – 2017. – №. 2 (8). – S. 74-77.

18. Syromyatnikov Yu.N. Obosnovanie profilya lemekha s napravlyayushchimi diskami pochvoobrabatyvayushchey rykhlitelno-separiruyushchey mashiny // Selskoe khozyaystvo. – 2017. – № 2. – S. 18-29. DOI: 10.7256/2453-8809.2017.2.23150.

19. Syromyatnikov Yu.N. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa dvizheniya pochvy po lemekhu pochvoobrabatyvayushchey rykhlitelno-separiruyushchey mashiny // Selskoe

khozyaystvo. – 2017. – № 1. – S. 48-55. DOI: 10.7256/2453-8809.2017.1.22037.

20. Syromyatnikov Yu.N. Obosnovanie formy naralnika minimalnogo tyagovogo soprotivleniya // Silskogospodarski mashini. – 2018. – № 39. – S. 117-132.

21. Syromyatnikov Yu.N. Sovershenstvovanie robochikh organov rotora rykhlitelno-separiruyushchey pochvoobrabatyvayushchey mashiny obespechivayushchikh minimalnye zatraty energii na ego rabotu // Inzheneriya prirodokoristuvannya. – 2018. – № 1 (9). – S. 91-95.

22. Syromyatnikov Yu.N. Rezultaty polevykh issledovaniy rotnoy pochvoobrabatyvayushchey rykhlitelno-separiruyushchey mashiny s eksperimentalnymi robochimi organami // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – № 5 (163). – S. 184-193.

23. Adler Yu.P., Markova Ye.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy. – Izd. vtoroe pererab. i dop. – M.: Nauka, 1976. – 280 s.

24. OST-70.215-73. Ispytanie selskokhozyaystvennoy tekhniki. Metody opredeleniya usloviy ispytaniy. – M.: Soyuzselkhoztekhnika, 1977.



УДК 621.365.5

**А.А. Багаев, С.О. Бобровский**  
A.A. Bagayev, S.O. Bobrovskiy

### ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА В ИНДУКТОРЕ ТВЧ УСТАНОВКИ

### THE INFLUENCE OF SURFACE EFFECT ON THE CURRENT MAGNITUDE IN THE INDUCTOR OF HIGH FREQUENCY CURRENT INSTALLATION

**Ключевые слова:** ТВЧ установка, индукционный нагрев, ток в индукторе, поверхностный эффект.

**Keywords:** high frequency current (HFC) installation, induction heating, inductor current, surface effect.

Для технологических процессов поверхностной закалки рабочих органов почвообрабатывающих и режущих орудий сельскохозяйственных машин широко используются установки индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) ЭЛСИТ 100/40-70. Контроль параметров режима индукционного нагрева, как показала практика, является затруднительным. Проблема заключается в том, что ток в индукторе контролируется в процентах от максимального тока. Измерение тока в процентах не позволяет проводить оптимизационные исследования, которые направлены на обеспечение максимальной энергоэффективности при наилучших качественных показателях процесса упрочнения. Требуется оценивать ток в индукторе в амперах. Сложность заключается в том, что ток в индукторе составляет порядка 2000 А. Прямое измерение тока подобной величины известными техническими средствами является затруднительным. Известно, что при частотах электромагнитного поля 40-70 кГц проявляется так называемый поверхностный эффект (скин-эффект), результатом которого является вытеснение тока в слои проводника, прилегающие к его поверхности. Наличие поверхностного эффекта сопровождается значительным увеличением сопротивления нагреваемой в ТВЧ установке детали. Усовершенствована предложенная авторами методика косвенного измерения тока индуктора ТВЧ установки с учетом поверхностного эффекта. Исследования проведены на примере индуктора, предназначенного для нагрева почвообрабатывающих органов типа «стрельчатая лапа». В результате полученных экспериментальных данных аналитическим способом определен ток в индукторе в амперах с учетом поверхностного эффекта. На основе экспериментально-аналитических исследований построены вольт-амперная, ампер-частотная, вольт-частотная характери-

стики и зависимость тока в амперах от тока в процентах. Для каждой зависимости получены уравнения регрессии.

For technological processes of surface hardening of the working parts of tillage and cutting tools of agricultural machines, induction heating plants with high frequency currents (HFC) ELSIT 100/40-70 are widely used. Monitoring the parameters of the induction heating mode is difficult. The problem is that the current in the inductor is controlled as a percentage of the maximum current. The measurement of current in percent does not allow carrying out optimization studies that are aimed at ensuring maximum energy efficiency with the best quality indices of the hardening process. It is required to estimate the current in the inductor in amperes. The difficulty lies in the fact that the current in the inductor is about 2000 A. Direct measurement of current of similar magnitude by known technical means is difficult. It is known that at frequencies of electromagnetic field of 40-70 kHz, the so-called surface effect appears, the result of which is the displacement of the current into the conductor layers adjacent to its surface. The presence of a surface effect is accompanied by a significant increase in the resistance of the part heated in the HFC. Improved technique of indirect measurement of the inductor current of the HFC installation is proposed by the authors; it takes into account the surface effect. The investigations were carried out using the inductor designed to heat a tillage part of a "duckfoot sweeps" type. As a result of the obtained experimental data, the current in the inductor in amperes is determined analytically by taking into account the surface effect. On the basis of experimental and analytical studies, volt-ampere, ampere-frequency, volt-frequency characteristics and the current dependence in amperes on current in percent are constructed. For each of the dependences, regression equations are obtained.

**Багаев Андрей Алексеевич**, д.т.н., проф., зав. каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: [BagaeV710@mail.ru](mailto:BagaeV710@mail.ru).

**Бобровский Сергей Олегович**, магистрант, каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: [sergej.bobrovskij.95@mail.ru](mailto:sergej.bobrovskij.95@mail.ru).

**Bagayev Andrey Alekseyevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: [bagaeV710@mail.ru](mailto:bagaeV710@mail.ru).

**Bobrovskiy Sergey Olegovich**, master's degree student, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: [sergej.bobrovskij.95@mail.ru](mailto:sergej.bobrovskij.95@mail.ru).

### Введение

Одним из перспективных направлений развития сельскохозяйственного машиностроения является совершенствование технологических процессов упрочнения поверхностей почвообрабатывающих и режущих орудий в процессе их производства и ремонта.

Для технологических процессов поверхностной закалки рабочих органов почвообрабатывающих и режущих орудий сельскохозяйственных машин в настоящее время широко используются установки ТВЧ нагрева. Одной из таких установок является

ТВЧ установка ЭЛСИТ 100/40-70 [1] мощностью 100 кВт с рабочим диапазоном частот 40-70 кГц.

Температура, толщина нагреваемого слоя, полезная мощность, переданная детали, КПД и, вследствие этого, энергоэффективность и твердость упрочненной поверхности почвообрабатывающих и режущих органов сельскохозяйственных агрегатов определяются множеством параметров: геометрическими размерами и формой индуктора, величиной воздушного зазора, значением мощности, подводимой к колебательному контуру и др. Для получения наилучшего техноло-

гического результата требуется оптимизация режимных параметров.

Контроль параметров режима индукционного нагрева является затруднительным, так как в процессе индукционного нагрева в ТВЧ установке ЭЛСИТ 100/40-70 контролируется лишь ток в индукторе, выраженный в процентах от максимального тока.

Измерение тока в процентах не позволяет проводить оптимизационные исследования, направленные на обеспечение максимальной энергоэффективности при наилучших качественных показателях процесса упрочнения.

В связи с этим насущной потребностью является разработка методики оценки тока в индукторе, выраженного в амперах.

Сложность заключается в том, что ток в индукторе велик и составляет порядка 2000 А частотой до 70 кГц. В этом случае прямое измерение тока подобной величины известными техническими средствами является затруднительным, в частности стандартные сердечники трансформаторов тока из листовой электротехнической стали подвержены значительному нагреву.

Сформулированное противоречие составляет суть актуальной научно-технической проблемы.

Для решения этой проблемы в работах [2-5] предложена методика косвенного определения тока в индукторе ТВЧ установки.

Вместе с тем предлагаемая методика не учитывает так называемого поверхностного эффекта (скин-эффекта), благодаря которому активное сопротивление металлических проводников переменному току больше, чем сопротивление того же проводника току постоянному. Этот факт является причиной того, что электрический ток по сечению проводника распределяется неравномерно и в основном концентрируется в поверхностном слое.

Поверхностный эффект в значительной степени проявляется на высоких частотах.

В связи с этим **целью** исследования является совершенствование методики определения тока в индукторе ТВЧ установки с учетом поверхностного эффекта.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующую **задачу**: установить взаимную связь между реальным током в индукторе ТВЧ установки, напряжением на индукторе, его частотой и током в индукторе, выраженном в процентах с учетом поверхностного эффекта.

Существующие методики оценки тока в индукторе ТВЧ установок [6-8] в основном основаны на определении теплосодержания нагреваемых заготовок при нагреве до температуры соответствующей точке магнитных превращений при постоянстве мощности ТВЧ установки и частоты. Следует отметить, что процесс определения теплосодержания нагретой ТВЧ способом детали является весьма трудозатратным и продолжительным.

Кроме того, указанные выше допущения не выполняются при использовании установки ЭЛСИТ, для которой, как показано в [5], процесс нагрева сопровождается изменением как напряжения на индукторе, так и тока в индукторе и его частоты.

В связи с этим для учета влияния поверхностного эффекта на величину тока в индукторе использована методика, представленная в [9, 10].

**Определение тока в индукторе с учетом поверхностного эффекта.** По аналогии с работой [5] в качестве исследуемого индуктора принят индуктор для нагрева «стрельчатой лапы», имеющий следующие размеры поперечного сечения: длина  $a=2$  см, ширина  $b=0,5$  см, периметр  $P=2a+2b=5$  см. Эквивалентный диаметр находится путем приравнивания периметра реального прямоугольного в сечении индуктора  $P$  и длины окружности индуктора цилиндрического сечения  $\pi \cdot D$ :

$$D = \frac{2a + 2b}{\pi} = 1,6 \text{ см.}$$

Тогда радиус эквивалентного цилиндрического проводника:

$$r = D/2 = 1,6/2 = 0,8 \text{ см} = 0,008 \text{ м.}$$

Омическое сопротивление индуктора  $R=0,00099$  Ом [5].

Активное сопротивление цилиндрического проводника с учетом поверхностного эффекта:

$$R_2 = R \cdot k_n = R(1 + 0,55k_\sigma^2 - 0,025k_\sigma^4) \quad \text{при } 0 \leq k_\sigma \leq 2; \quad (1)$$

$$R_2 = 1,4R \cdot k_\sigma \quad \text{при } k_\sigma > 2, \quad (2)$$

где  $R$  – омическое сопротивление проводника постоянному току, Ом;

$k_n$  – коэффициент поверхностного эффекта;

$k_\sigma$  – безразмерный коэффициент:

$$k_\sigma = \frac{r}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \mu_r}{\rho_m}}, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус цилиндрического проводника, м;

$f$  – частота тока, Гц;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0=1,26 \cdot 10^{-6}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  
 $\rho_m=2 \cdot 10^{-8}$  – удельное сопротивление меди, Ом·м.

При этом относительная магнитная проницаемость:

$$\mu_r = \frac{\mu_{абс}}{\mu_0}, \quad (4)$$

где  $\mu_{абс} = 1,256629 \cdot 10^{-6}$  – абсолютная магнитная проницаемость.

Индуктивное сопротивление проводника, Ом:

$$X_2 = R \cdot 1,26k_0^2 \cdot (1 - 0,33k_0^2) \text{ при } 0 \leq k_0 \leq 1; \quad (5)$$

$$X_2 = 0,84R \cdot k_0 \text{ при } k_0 > 1. \quad (6)$$

Так как рассчитанный по формуле (3) безразмерный коэффициент  $k_0 > 2$ , то для определения активного сопротивления цилиндрического проводника с учетом поверхностного эффекта используем формулу (2).

Поскольку безразмерный коэффициент  $k_0 > 1$ , индуктивное сопротивление проводника определяем по формуле (6).

Полное сопротивление металлических проводников переменному току, Ом:

$$Z = \sqrt{R_2^2 + (X_1^2 - X_2^2)}, \quad (7)$$

где  $R_2$ ,  $X_1$  и  $X_2$  – активное, емкостное и индуктивное сопротивления проводника переменному току, Ом.

Емкостное сопротивление батареи конденсаторов установки ЭЛСИТ100/40-70:

$$X_1 = \frac{1}{\omega \cdot C_1}, \quad (8)$$

где  $C=15,6$  – емкость батареи конденсаторов, мкФ;  $\omega$  – угловая частота, рад/с.

Реальный ток в индукторе  $I_1$ , А определяется приложенным к индуктору напряжением  $U_1$ , активным  $R_1$  и индуктивным  $X_1$  сопротивлениями индуктора в резонансном режиме:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1}. \quad (9)$$

Результаты расчета сведены в таблицу. Измененными являются напряжение на индукторе  $U_1$ , частота  $f$ , ток в индукторе, измеренный в процентах.

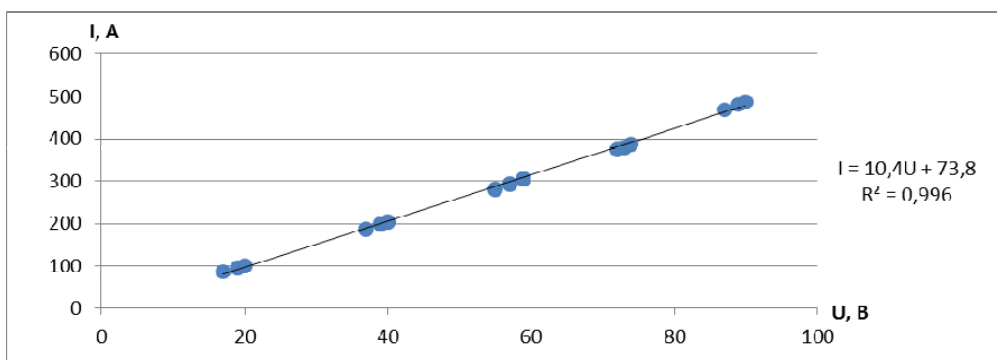
Графическая интерпретация результатов представлена на рисунках 1-4.

Нелинейные зависимости на рисунках 3 и 4 демонстрируют увеличение частоты напряжения на зажимах индуктора при одновременном уменьшении напряжения и тока в индукторе.

Таблица

**Результаты экспериментально-аналитических исследований**

Средние значения по 3-м опытам												
Ток нагрузки, %	I, А		U, В	f, Гц	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$k_0$	$R_2$ , Ом	$X_1$ , Ом	$X_2$ , Ом		$Z$ , Ом	
	без учета скин-эффекта	с учетом скин-эффекта							без учета скин-эффекта	с учетом скин-эффекта	без учета скин-эффекта	с учетом скин-эффекта
20	267,8	94,3	19	55333	347493	13,22	0,0183	0,1147	0,1845	0,0110	0,070	0,198
40	474,1	196,4	39	53267	334096	12,97	0,0180	0,1103	0,1919	0,0108	0,082	0,197
60	675,5	293,1	57	52633	330956	12,89	0,0179	0,1092	0,1937	0,0107	0,084	0,195
80	832,3	379,8	73	52033	327397	12,82	0,0178	0,1080	0,1958	0,0107	0,088	0,192
100	993,3	478,8	89	51800	325723	12,79	0,0177	0,1075	0,1968	0,0106	0,089	0,185



**Рис. 1. Зависимость тока индуктора I, А, от напряжения U, В**

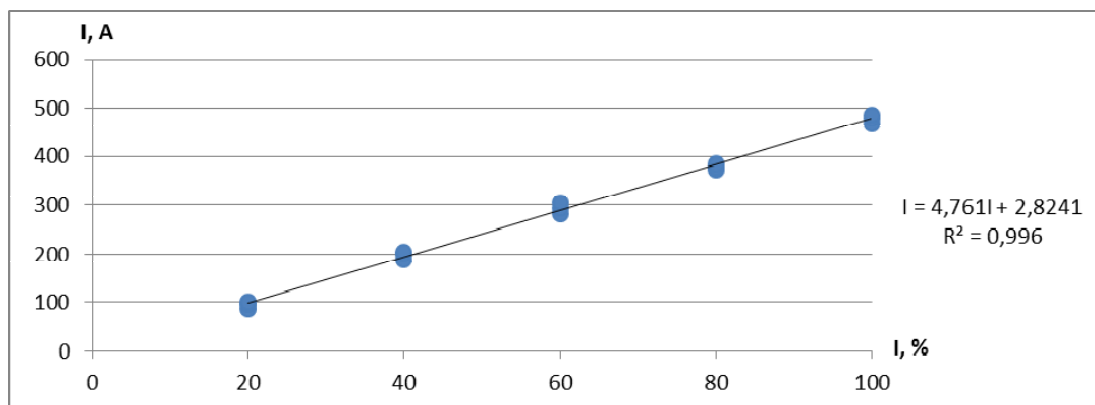


Рис. 2. Зависимость тока индуктора  $I$ , А, от тока индуктора, выраженного в процентах, от максимального значения  $I$ , %

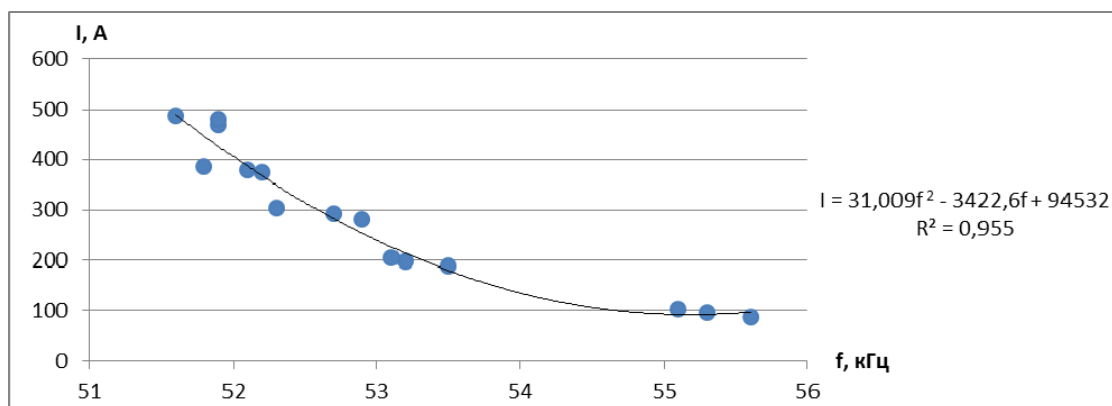


Рис. 3. Зависимость тока индуктора  $I$ , А, от частоты  $f$ , кГц

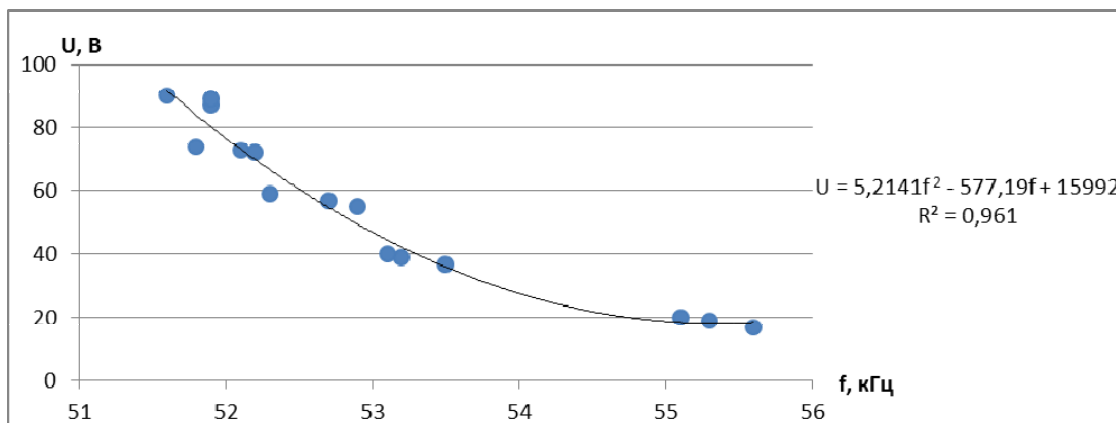


Рис. 4. Зависимость напряжения на индукторе  $U$ , В, от частоты  $f$ , кГц

Для каждой зависимости, представленной на рисунках 1-4, получено уравнение регрессии, аппроксимирующее полученные результаты:

для зависимости  $I=f(I\%)$ :

$$I = 4,76 \cdot I + 2,8241 \text{ при } R^2 = 0,984; \quad (10)$$

для зависимости  $I=f(U)$ :

$$I = 10,4 \cdot U + 73,8 \text{ при } R^2 = 0,996; \quad (11)$$

для зависимости  $I=f(f)$ :

$$I = 31,009 \cdot f^2 - 3422,6 \cdot f + 94532 \text{ при } R^2 = 0,955; \quad (12)$$

для зависимости  $U=f(f)$ :

$$U = 5,2141 \cdot f^2 - 577,19 \cdot f + 15992$$

$$\text{при } R^2 = 0,961, \quad (13)$$

где  $R^2$  – величина достоверности аппроксимации, представляющая собой корреляционное отношение, численно равное возведенному в квадрат коэффициенту множественной корреляции.

**Выводы**

Ток, демонстрируемый индикаторами современных ТВЧ установок и выраженный в процентах, не дает представления о реальном токе в индукторе. Одинаковое процентное значение тока на индикаторе ЭЛСИТ не подразумевает равенство реальных токов в индукторах различной геометрии. Это затрудняет проведение научно-исследовательских работ по исследованию процессов упрочнения деталей с точки зрения мощности, поставляемой индуктором в деталь, и повышению энергоэффективности ТВЧ технологии.

Установлено, что при частотах электромагнитного поля 40-70 кГц проявляется так называемый поверхностный эффект, проявлением которого является вытеснение тока в слои, прилегающие к поверхности, что сопровождается значительным увеличением сопротивления нагреваемой в ТВЧ установке детали.

Этот факт требует особого учета при калибровке используемого для измерения тока в индукторе амперметра.

**Библиографический список**

1. ЭЛСИТ. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: URL: <https://ЭЛСИТ.РФ> (дата обращения: 13.10.2017).
2. Бобровский С.О. Методика определения истинного значения тока в индукторе высокочастотной установки индукционного нагрева // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета: сборник научных трудов. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – № 1. – С. 54-57.
3. Бобровский С.О. Датчик тока высокочастотной индукционной установки для предприятий Барнаула // Молодежь – Барнаулу: матер. XVII-XIX городской науч.-практ. конф. молодых ученых. – Барнаул: РИО Алтайского, 2018. – Ч. XIX. – С. 551-554.
4. Бобровский С.О., Багаев А.А. Информационно-измерительная система для измерения тока в индукторе высокочастотной индукционной установки // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб.

матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф. (15-16 февраля 2018 г.): в 2 кн. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – Кн. 2. – С. 154-155.

5. Багаев А.А., Бобровский С.О. Основные положения методики косвенного измерения тока в индукторе ТВЧ-установки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета: сборник. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – № 5. – С. 171-178.

6. Слухоцкий А.Е. Индукторы. – Л.: Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1989. – 69 с.

7. Изаков Ф.Я., Козинский В.А., Лаптев А.В., Лукиенко Т.Н., Шаповалов А.Т., Яснов Г.А. Практикум по применению электрической энергии в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1972. – 304 с.

8. Гайдук В.Н., Шмигель В.Н. Практикум по электротехнологии. – М.: Агропромиздат, 1989. – 175 с.

9. Басов А.М., Быков В.Г., Лаптев А.В., Файн В.Б. Электротехнология. – М.: Агропромиздат, 1985. – 256 с.

10. Багаев А.И., Багаев А.А., Куликова Л.В. Электротехнология: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 320 с.

**References**

1. ELSIT [Elektronnyy resurs]. – Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: URL: <https://ELSIT.RF> (data obrashcheniya: 13.10.2017).
2. Bobrovskiy S.O. Metodika opredeleniya istinnogo znacheniya toka v induktore vysokochastotnoy ustanovki induktsionnogo nagreva // Vestnik molodezhnoy nauki Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta: sbornik nauchnykh trudov. – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2018. – № 1. – S. 54-57.
3. Bobrovskiy S.O. Datchik toka vysokochastotnoy induktsionnoy ustanovki dlya predpriyatiy Barnaula // Molodezh – Barnaulu: materialy XVII-XIX gorodskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh. – Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2018. – Chast XIX. – S. 551-554.
4. Bobrovskiy S.O., Bagaev A.A. Informatsionno-izmeritelnaya sistema dlya izmereniya toka v induktore vysokochastotnoy induktsionnoy ustanovki //

Agrarnaya nauka – selskomu khozyaystvu: sbornik materialov: v 2 kn. / XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (15-16 fevralya 2018 g.). – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2018. – Kn. 2. – S. 154-155.

5. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Osnovnye polozheniya metodiki kosvennogo izmereniya toka v induktore TVCh-ustanovki // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – № 5. – S. 171-178.

6. Slukhotskiy A.Ye. Induktory. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1989. – 69 s.

7. Izakov F.Ya., Kozinskiy V.A., Laptev A.V., Lukienko T.N., Shapovalov A.T., Yasnov G.A. Praktikum po primeneniyu elektricheskoy energii v selskom khozyaystve. – M.: Kolos, 1972. – 304 s.

8. Gayduk V.N., Shmigel V.N. Praktikum po elektrotekhnologii. – M.: Agopromizdat, 1989. – 175 s.

9. Basov A.M., Bykov V.G., Laptev A.V., Fayn V.B. Elektrotekhnologiya. – M.: Agropromizdat, 1985. – 256 s.

10. Bagaev A.I., Bagaev A.A., Kulikova L.V. Elektrotekhnologiya: uchebnoe posobie. – Barnaul: Izdvo AGAU, 2006. – 320 s.

