

Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 10 (72). – S. 92-96.

7. Gordeev A.S. Modelirovanie v agroinzhenerii: ucheb. posobie. – Michurinsk: Izd-vo MichGAU, 2007.

8. OST 23.2.164-87 Lapy i stoyki kultivatorov. Obshchie tekhnicheskie usloviya.

9. Kiryanov D.V. Mathcad 15/MathcadPrime 1.0: spravochnik. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2012.

10. Ayzek M.P. Vychisleniya, grafiki i analiz dannykh v Excel 2010: spravochnik. – SPb.: Nauka i Tekhnika, 2013.

11. Fedorenko I.Ya., Morozova S.V. Optimizatsiya i prinyatie resheniy v agroinzhenernykh zadachakh: ucheb. posobie. – SPb.: Lan, 2016.

12. Gmurman V.Ye. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebn. – M.: Yurayt, 2014.

13. Ishkov A.V., Ivanayskiy V.V., Krivochurov N.T. i dr. Primenenie variatsionnykh ryadov v issledovaniyakh po tekhnologii selskokhozyaystvennogo mashinostroeniya i tribotekhnike: ucheb. posobie. – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2017. – 50 s.



УДК 621.365.5

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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА В ИНДУКТОРЕ ТВЧ-УСТАНОВКИ

BASIC PROVISIONS OF INDIRECT CURRENT MEASUREMENT PROCEDURE IN THE INDUCTOR OF HFC INSTALLATION

Ключевые слова: ТВЧ-установка, индукционный нагрев, индуктор, колебательный RLC-контур, параметры индуктора, система измерения, калибровка амперметра.

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 процен-

тах не позволяет проводить оптимизационные исследования, посвященные получению максимальной твердости поверхности почвообрабатывающих и режущих рабочих органов сельскохозяйственных машин. 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. Стандартные сердечники трансформаторов тока из листовой электротехнической стали подвержены значительному нагреву. Предложена методика косвенного измерения тока индуктора ТВЧ-установки. Исследования проведены на примере индуктора, предназначенного для нагрева рабочих органов типа «стрельчатая лапа».

Экспериментальными исследованиями определены параметры индуктора (индуктивность и активное сопротивление) ТВЧ-установки путем осциллографирования напряжения на индукторе. При различной токовой нагрузке высокочастотным вольтметром и измерителем частоты были измерены напряжение на индукторе и его частота. В результате полученных данных аналитическим способом определен ток в индукторе в амперах. На основе экспериментально-аналитических исследований построены вольт-амперная, ампер-частотная, вольт-частотная характеристики и зависимость тока в амперах от тока в процентах. Для каждой зависимости получены уравнения регрессии. Предложено оценивать реальный ток в индукторе ТВЧ-установки косвенным методом с помощью разработанной измерительной системы. Осуществлена калибровка амперметра.

Keywords: *HFC installation, induction heating, inductor, oscillatory RLC-circuit, inductor parameters, measuring system, calibration of ammeter.*

For technological processes of surface hardening of the working organs 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, as practice has shown, is difficult. The problem is that the current in the inductor is controlled as a percentage of the maximum current.

Measurement of current in percent does not allow carrying out optimization studies devoted to obtaining the maximum hardness of the surface of the tillers and cutting working bodies of agricultural machines. 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 a current of similar magnitude by known technical means is difficult. The standard cores of current transformers made of electrotechnical steel sheet are subject to considerable heating. A technique for indirect measurement of the inductor current of a HFC installation is proposed. The investigations were carried out using the example of an inductor designed to heat working organs of the "pointed-foot" type. Experimental studies have determined the parameters of the inductor (inductance and active resistance) of the HFC installation by oscillating the voltage on the inductor. With different current loads, a high-frequency voltmeter and a frequency meter measured the voltage on the inductor and its frequency. As a result of the obtained data, the current in the inductor in amperes is determined analytically. 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 dependence, regression equation is obtained. It is proposed to estimate the real current in the inductor of the HFC installation by an indirect method using the developed measuring system. The ammeter has been calibrated.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., проф., зав. каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: Bagaev710@mail.ru.

Бобровский Сергей Олегович, магистрант, каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: 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.

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.

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].

В состав подобной установки входит комплект индукторов, предназначенный для нагрева деталей определенной конфигурации. Индукторы при

этом рассчитаны для работы в определенном диапазоне частот. В частности установка ЭЛСИТ 100/40-70 предназначена для работы с индукторами в диапазоне частот 40-70 кГц для рабочих органов определенной геометрической формы (например, стрелчатая лапа).

Обычно производитель ТВЧ-установок разрабатывает индукторы, алгоритмы управления для конкретного рабочего органа. Но так как рабочие органы могут иметь разнообразную форму, следовательно, индукторы применяются для каждой детали соответствующей формы. На рисунке 1 представлены рабочие органы сельскохозяйственных агрегатов и индукторы для их индукционного нагрева.



Рис. 1. Рабочие органы сельскохозяйственных агрегатов и индукторы для их индукционного нагрева

Индукторы, изготовленные не на предприятии-изготовителе ТВЧ-установок, обладают неизвестными значениями индуктивности и активного сопротивления. Вследствие чего возможно срабатывание защиты ТВЧ-установки, если частота тока будет меньше 40 кГц, или больше 70 кГц.

Температура, толщина нагреваемого слоя и, вследствие этого, 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 технологического результата требуется оптимизация режимных параметров.

Контроль параметров режима индукционного нагрева, как показала практика, является затруднительным, так как в процессе индукционного нагрева в ТВЧ-установки ЭЛСИТ 100/40-70 контролируется лишь ток в индукторе, выраженный в процентах от максимального тока (рис. 2).



Рис. 2. Индикатор ТВЧ-установки ЭЛСИТ 100/40-70

Таким образом, ТВЧ-установка ЭЛСИТ 100/40-70 позволяет измерять ток I_1 , выраженный исключительно в процентах от 0 до 100%. Измерение тока в процентах не позволяет проводить оптимизационные исследования. В связи с этим требуется оценивать ток в индукторе, выраженный 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.

Таким образом, современные ТВЧ-установки не позволяют установить однозначную связь между током в процентах и реальным током в индукторе, выраженного в амперах, что не дает возможность мощность нагрева детали и проводить оптимизационные исследования для обеспечения максимальной твердости детали.

В связи с этим **целью** исследования является повышение эффективности технологических процессов восстановления и упрочнения поверхностей почвообрабатывающих и режущих рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Для реализации поставленной цели необходимо решить ряд следующих **задач**:

1) установить взаимную связь между реальным током в индукторе ТВЧ-установки, напряжением на индукторе, его частотой и током в индукторе, выраженном в процентах;

2) разработать методику оценки реального тока в индукторе ТВЧ-установки;

3) разработать измерительную систему, позволяющую производить оценку реального тока в индукторе.

Методика косвенного определения тока.

Учитывая то, что прямыми методами измерения поставленную задачу не решить, следует применять косвенные методы измерения с соответствующей статистической оценкой погрешности [2].

Структурная схема предлагаемой методики косвенного измерения тока индуктора ТВЧ-установки представлена на рисунке 3.

Для обеспечения рационального режима нагрева детали необходимо знание параметров индуктора при индукционном нагреве. Учитывая небольшое значение напряжения на индукторе установки ЭЛСИТ-100-40/70 (под нагрузкой – 50 В) целесообразно рассмотреть возможность определения параметров индуктора путем осцил-

лографирования напряжения на индукторе [3]. Для исследований принят индуктор для нагрева «стрельчатой лапы».

Предлагаемая методика основана на осциллографировании напряжения индуктора при разряде конденсаторной батареи на исследуемый индуктор с последующим установлением характеристик кривой разряда и определением аналитическим способом параметров индуктора (индуктивности и активного сопротивления).

Параметры исследуемого индуктора были получены следующие: индуктивность $L = 0,33$ мкГн, активное сопротивление $R = 0,00099$ Ом.

Высокочастотным вольтметром и измерителем частоты были измерены напряжение на индукторе U , V , и его частота f , кГц, при различной токовой нагрузке в индукторе, выраженном в процентах (от 20 до 100%) и представленном на индикаторе ТВЧ-установки ЭЛСИТ (рис. 4) [4].

Электрическая схема колебательного RLC-контура представлена на рисунке 4.



Рис. 3. Методика косвенного измерения тока индуктора ТВЧ-установки

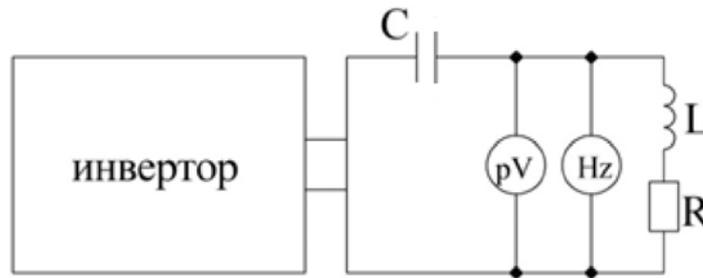


Рис. 4. Электрическая эквивалентная схема измерения напряжения U и его резонансной частоты f в колебательном RLC-контуре ТВЧ-установки:

pV – высокочастотный вольтметр; Hz – частотомер установки ЭЛСИТ;
 $L=0,33$ мкГн – индуктивность индуктора для нагрева «стрельчатой лапы»;
 $C=15,6$ мкФ – емкость батареи конденсаторов установки ЭЛСИТ

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

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_1}{\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}}, \quad (1)$$

где L_1 – индуктивность индуктора, $L = 0,33$ мкГн;

C_1 – емкость колебательного RLC-контра, $C_1=15,6$ мкФ для установки ЭЛСИТ 100/40-70, $C_1=const$, емкость батареи конденсаторов не подлежит изменению в процессе эксплуатации;

ω – угловая частота, рад/с.

В таблице представлены результаты экспериментально-аналитических исследований.

Графическая интерпретация результатов представлена на рисунках 5-8.

Таблица

Результаты экспериментально-аналитических исследований [4]

| Ток нагрузки, % (по индикатору ЭЛСИТ) | I, A (рассчитанное) | | | U, B (измеренное) | | | $f, кГц$ (измеренное) | | | $\omega, с^{-1}$ (рассчитанное) | | | $X_L=2\pi f L_1, ом$ (рассчитанное) | | | $X_C=1/(2\pi f C_1), ом$ (рассчитанное) | | | $Z=X_C-X_L, ом$ (рассчитанное) | | |
|--|--------------------------|-------|-------|------------------------|----|----|--------------------------|------|------|------------------------------------|--------|--------|--|-------|-------|--|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|
| | Повторность измерений | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 20 | 248,7 | 271,5 | 281,4 | 17 | 19 | 20 | 55,6 | 55,3 | 55,1 | 349168 | 347284 | 346028 | 0,115 | 0,115 | 0,114 | 0,184 | 0,185 | 0,185 | 0,068 | 0,070 | 0,071 |
| 40 | 463,0 | 477,8 | 486,7 | 37 | 39 | 40 | 53,5 | 53,2 | 53,1 | 335980 | 334096 | 333468 | 0,111 | 0,110 | 0,110 | 0,191 | 0,192 | 0,192 | 0,080 | 0,082 | 0,082 |
| 60 | 660,1 | 674,8 | 679,8 | 55 | 57 | 59 | 52,9 | 52,7 | 52,3 | 332212 | 330956 | 328444 | 0,110 | 0,109 | 0,108 | 0,193 | 0,194 | 0,195 | 0,083 | 0,084 | 0,087 |
| 80 | 824,1 | 830,0 | 824,9 | 72 | 73 | 74 | 52,2 | 52,1 | 51,8 | 327816 | 327188 | 325304 | 0,108 | 0,108 | 0,107 | 0,196 | 0,196 | 0,197 | 0,087 | 0,088 | 0,090 |
| 100 | 976,2 | 998,7 | 990,3 | 87 | 89 | 90 | 51,9 | 51,9 | 51,6 | 325932 | 325932 | 324048 | 0,108 | 0,108 | 0,107 | 0,197 | 0,197 | 0,198 | 0,089 | 0,089 | 0,091 |

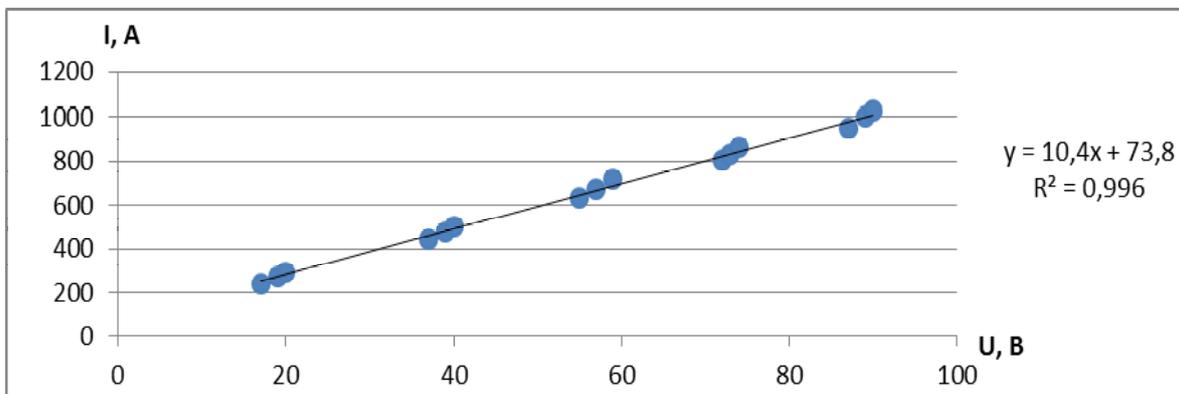


Рис. 5. Зависимость тока индуктора I, A , от напряжения U, B

Анализ результатов на рисунке 5 свидетельствует о том, что с уменьшением тока, выраженного в процентах, уменьшается ток, представленный в амперах. При этом току $I=100\%$ соответствует ток $I=1000$ А. Для индукторов иной формы с другими значениями L и R это соответствие нарушается.

График на рисунке 6 показывает, что одновременно с уменьшением $I, \%$ и I, A , уменьшается и действующее значение напряжения на индукторе.

Нелинейные зависимости на рисунках 7 и 8 демонстрируют увеличение частоты напряжения на зажимах индуктора при одновременном уменьшении напряжения и тока в индукторе.

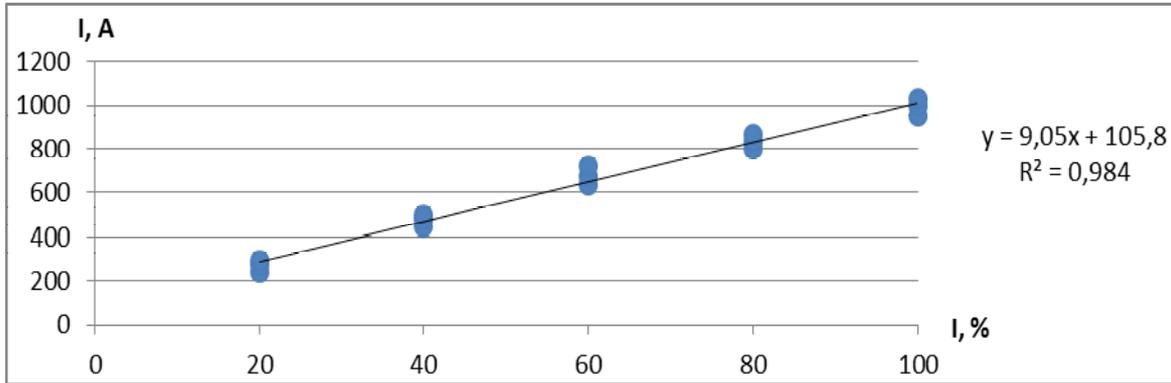


Рис. 6. Зависимость тока индуктора I, A , от напряжения U, B

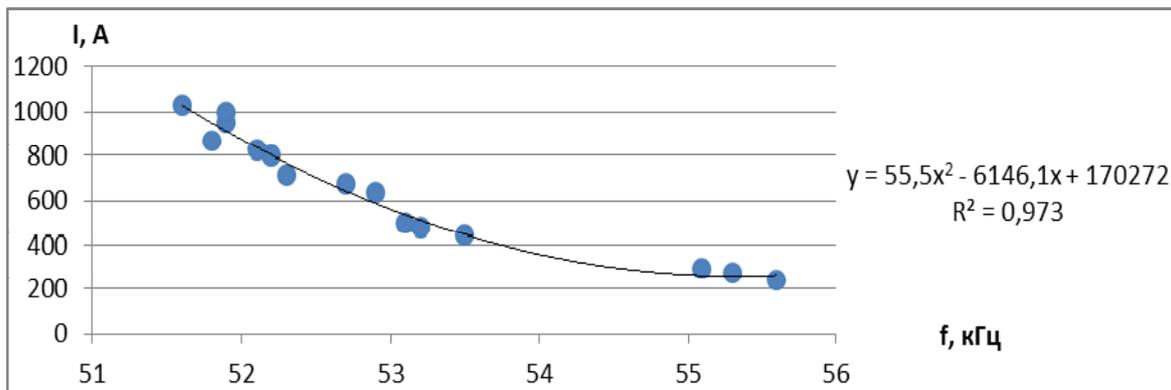


Рис. 7. Зависимость тока индуктора I, A , от частоты $f, кГц$

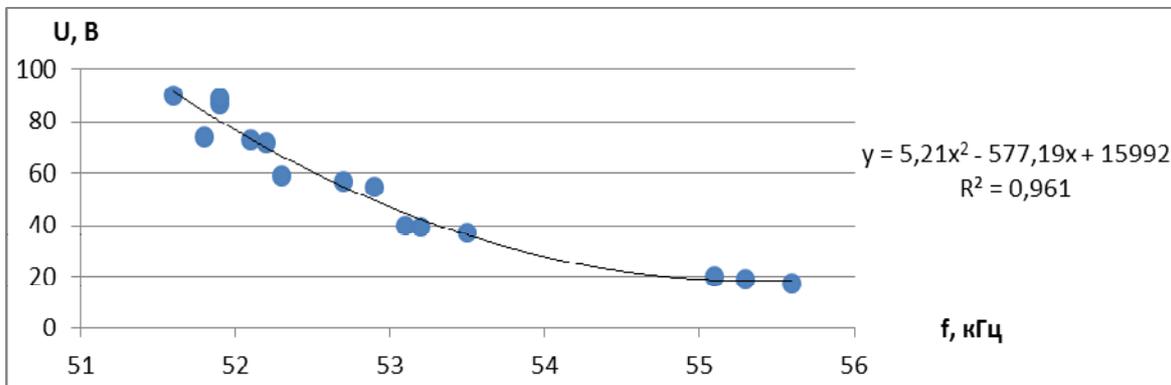


Рис. 8. Зависимость напряжения на индукторе U, B , от частоты $f, кГц$

Для каждой зависимости, представленной на рисунках 5-8, получено уравнение регрессии, аппроксимирующее полученные результаты:

для зависимости $I=f(I\%)$

$$I = 9,05 \cdot I + 105,8 \text{ при } R^2 = 0,984; \quad (2)$$

для зависимости $I=f(U)$

$$I = 10,4 \cdot U + 73,8 \text{ при } R^2 = 0,996; \quad (3)$$

для зависимости $I=f(f)$

$$I = 55,5 \cdot f^2 - 6146,1 \cdot f + 170272 \text{ при } R^2 = 0,973; \quad (4)$$

для зависимости $U=f(f)$

$$U = 5,21 \cdot f^2 - 577,19 \cdot f + 15982 \text{ при } R^2 = 0,961, \quad (5)$$

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

Предлагаемая система косвенного измерения тока индуктора ТВЧ-установки представлена в работах [5, 6].

Последовательность разработки системы косвенного измерения тока индуктора ТВЧ-установки включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор материала магнитопровода кольцевого трансформатора тока высокой частоты;
- 2) выбор обмоточного проводника высокочастотного трансформатора тока;
- 3) оценка напряжения на вторичной обмотке кольцевого трансформатора тока;
- 4) выбор параметров амперметра, диодов, подстроечного резистора;
- 5) калибровка амперметра.

После установления соответствия токов в индукторе, выраженных в % и А, и разработки измерительной системы осуществляется калибровка амперметра.

Калибровка амперметра [7] осуществляется с использованием переменного подстроечного резистора $R_{ПЕР}$.

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 изучению процессов упрочнения деталей с точки зрения мощности, поставляемой индуктором в деталь и повышению энергоэффективности ТВЧ-технологии.

Оценка реального тока в индукторе ТВЧ-установки произведена косвенным методом путем разработки измерительной системы, элементы которой обладают способностью функционирования на частотах электромагнитного поля 40-70 кГц.

Исследования проведены на примере индуктора, предназначенного для нагрева рабочих органов типа «стрельчатая лапа».

Реализация предложенной методики для индукторов иной формы требует предварительного экспериментального определения его индуктивности.

Библиографический список

1. ЭЛСИТ. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: URL: <https://ЭЛСИТ.РФ> (дата обращения: 13.10.2017).
2. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
3. Лазаревич З., Болотовский Ю.И., Гутин Л.И., Таназлы Г.И., Шуляк А.А. Об одном варианте практической реализации системы измерения параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 78-80.
4. Бобровский С.О. Методика определения истинного значения тока в индукторе высокочастотной установки индукционного нагрева // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета: сб. науч. тр. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – № 1. – С. 54-57.
5. Бобровский С.О. Датчик тока высокочастотной индукционной установки для предприятий Барнаула // Молодежь – Барнаул: матер. XVII-XIX городской науч.-практ. конф. молодых ученых. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2018. – Ч. XIX. – С. 551-554.
6. Бобровский С.О., Багаев А.А. Информационно-измерительная система для измерения тока

в индукторе высокочастотной индукционной установки // Аграрная наука – сельскому хозяйству: в 2 кн.: сб. матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф. (15-16 февраля 2018 г.). – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – Кн. 2. – С. 154-155.

7. Белоусов Ю.М., Романова Л.А., Усеинов А.Р. Поверка и калибровка амперметров, вольтметров, ваттметров и варметров: учебное пособие. – Электрон. текстовые данные. – М.: Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. – 66 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/44270.html>. – ЭБС «IPRbooks».

References

1. ELSIT [Elektronnyy resurs]. – Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: URL: <https://ELSIT.RF> (data obrashcheniya: 13.10.2017).

2. Kulikovskiy K.L., Kuper V.Ya. Metody i sredstva izmereniy: uchebnoe posobie dlya vuzov. – М.: Energoatomizdat, 1986. – 448 s.

3. Lazarevich Z. Ob odnom variante prakticheskoy realizatsii sistemy izmereniya parametrov induktorov ustanovok induktsionnogo nagreva na rezhimakh, blizkikh k nominalnym / Z. Lazarevich, Yu.I. Bolotovskiy, L.I. Gutin, G.I. Tanazly, A.A. Shulyak // Silovaya elektronika. – 2007. – № 4. – S. 78-80.

4. 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.

5. 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.

6. Bobrovskiy S.O., Bagaev A.A. Informatsionno-izmeritelnaya sistema dlya izmereniya toka v induktore vysokochastotnoy induktsionnoy ustanovki // Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaystvu: sbornik materialov: v 2 kn. / XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (15-16 fevralya 2018 g.). – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2018. – Кн. 2. – S. 154-155.

7. Belousov Yu.M. Poverka i kalibrovka ampermetrov, voltmetrov, vattmetrov i varmetrov [Elektronnyy resurs]: uchebnoe posobie / Belousov Yu.M., Romanova L.A., Useinov A.R. – Elektron. tekstovye dannye. – М.: Akademiya standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2004. – 66 s. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/44270.html>. – ЭБС «IPRbooks».



УДК 631.361(031)

И.Я. Федоренко
I.Ya. Fedorenko

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ НА ЭНЕРГЕТИКУ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

EFFECT OF THE PARAMETERS OF THE HAMMER CRUSHER ROTOR ON THE ENERGY OF THE GRINDING PROCESS

Ключевые слова: фуражное зерно, молотковая дробилка, параметры ротора, дека, севкость решета, удельные затраты энергии, динамика электропривода.

Keywords: fodder grain, hammer crusher, rotor parameters, deck, sowing capacity of sieve, specific costs of energy, energy of electric drive.