

УДК 631.362.36.633

**ТАРУШКИН ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ**, докт. техн. наук, профессор

E-mail: s777z@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская 49, Москва, 127550, Российская Федерация

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В РАБОЧИХ ОРГАНАХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕПАРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Проведение исследований электрических процессов, протекающих в диэлектрических сепарирующих устройствах (ДСУ), позволяет не только расширить диапазон их применения, но и выработать рекомендации по их эффективной эксплуатации. Установлено, что в цепи питания могут происходить явления резонанса напряжения. Нерегулируемое изменение напряжения на электродах рабочего органа ведет к ухудшению качества сепарирования. Поэтому при выборе источника высокого напряжения, питающего рабочий орган ДСУ, необходимо его параметры сопоставлять с изменяющейся электрической ёмкостью рабочего органа сепарирующего устройства. При переменном напряжении высокой частоты поляризация семян сопровождается их нагревом, сушкой. В этом случае ДСУ приобретают новую функцию – возможность подсушивания семян. Отмечено, что в ДСУ заложена возможность отбора семян по их свойствам, в случае питания рабочего органа напряжением повышенной частоты. Это делает ДСУ более конкурентоспособным в сравнении с сепарирующими устройствами, в которых разделение семян осуществляется только по механическим свойствам.

**Ключевые слова:** электрические процессы, рабочий орган, диэлектрическое сепарирующее устройство, поляризация семян.

**Введение.** При подаче напряжения на рабочий орган диэлектрического устройства (ДСУ) в цепи питания такого устройства возникают электрические процессы [1]. Поэтому при разработке таких ДСУ важно знать, какие процессы и как могут повлиять на качество сепарирования.

**Цель исследования** – определить возможности ДСУ и выявить влияние электрических процессов на количество сепарирования при питании рабочих органов ДСУ промышленной и повышенной частоты.

**Материалы и методы.** При питании электродов рабочего органа диэлектрического сепарирующего устройства (ДСУ) синусоидальным напряжением

$$U = U_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Напряжённость электрического поля рабочего органа ДСУ будет изменяться поэтому же закону [2]:

$$E = E_m \sin \omega t. \quad (2)$$

Рабочий орган ДСУ представляет собой многоэлектродный конденсатор [3], обладающий в режиме холостого хода (в отсутствие семян) ёмкостью  $C_{xx}$ . Ёмкость  $C_{xx}$  – величина постоянная, так как она зависит от конструктивных параметров системы электродов и электрических свойств используемой

изоляции. Энергия электрического поля при отсутствии семян:

$$W_1 = \frac{C_{xx} U^2}{2} = C_{xx} U_m^2 \sin^2 \omega t / 2. \quad (3)$$

Поскольку

$$\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t) / 2, \quad (4)$$

то уравнение (3) можно записать в таком виде:

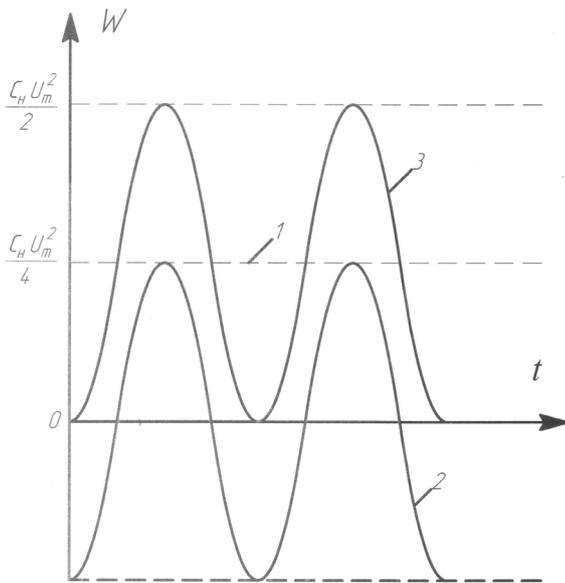
$$W_1 = \frac{C_{xx} U_m^2}{4} (1 - \cos 2\omega t). \quad (5)$$

В рабочем режиме (при наличии семян на рабочем органе ДСУ) ёмкость возрастает. Обозначим её через  $C_n$ . Значение  $C_n$  определяется не только конструктивными параметрами системы электродов, но и количеством и качеством сепарируемого материала. Энергия загруженного рабочего органа ДСУ:

$$W = \frac{C_n U_m^2}{4} (1 - \cos 2\omega t). \quad (6)$$

Энергия поляризованной зерновой массы

$$W_2 = W - W_1 = \frac{U_m^2}{4} (C_n - C_{xx}) (1 - \cos 2\omega t). \quad (7)$$



**Рис. 1. Изменение энергии электрического поля, создаваемого рабочим органом ДСУ:**  
 1 – постоянная составляющая; 2 – переменная;  
 3 – изменение во времени

**Результаты и обсуждение.** На рисунке 1 показано изменение энергии электрического поля рабочего органа ДСУ во времени. Из анализа этих графиков и зависимости (3), (6) и (7) следует:

1. Изменение энергии электрического поля создаваемого рабочим органом ДСУ – следствие изменения электрической ёмкости электродов. В рабочем режиме ДСУ ёмкость электродов в общем случае – величина переменная, зависящая от количества и качества сепарируемого материала, который поступает на рабочий орган. Из формулы (6) следует, что энергия загруженного семенами рабочего органа ДСУ тем больше, чем больше поступает семян и чем выше их диэлектрическая проницаемость.

2. Энергия поляризации зерновой массы пропорциональна квадрату напряжения и изменяется с удвоенной частотой поля. Так как взаимодействие поляризованных зарядов с полем создает силы, действующие на зерно, то закон изменения этих сил аналогичен закону изменения энергии поля.

Таким образом, энергия электрического поля рабочего органа увеличивается по мере его загрузки семенами. С ростом энергии растет мощность установки и потребляемый ток. Если учесть, что рабочий орган ДСУ представляет собой чисто емкостную нагрузку, то при подаче на него синусоидального напряжения ( $u = U_m \sin \omega t$ ) ток будет изменяться по такому закону:

$$i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_m \cos \omega t. \quad (8)$$

Мгновенная мощность:

$$p = ui = UI \sin 2\omega t, \quad (9)$$

где  $U$  и  $I$  – действующие значения напряжения и силы тока. Среднее значение мощности:

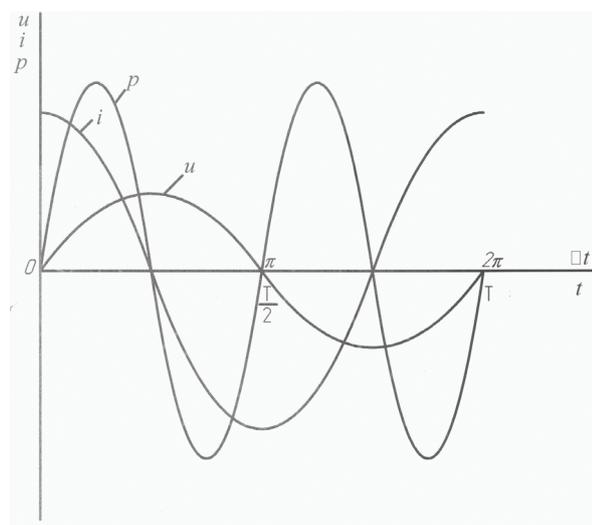
$$p_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = 0, \quad (10)$$

где  $T$  – период переменного поля.

Характер изменения этих величин показан на рисунке 2, откуда следует, что мгновенная мощность, как и энергия электрического поля, изменяется с частотой, вдвое большей, чем частота питающего напряжения. Среднее же значение мощности (активная мощность) равно нулю, т.е. сам рабочий орган ДСУ не потребляет активной мощности.

Так как электрическая цепь сепарирующего устройства содержит емкость, индуктивность и активное сопротивление, то напряжение на рабочем органе зависит от соотношения параметров  $r, L$  и  $C$ . Более того, в цепи может произойти и явление резонанса напряжений, а резкое изменение (колебание) напряжения на электродах ведет к ухудшению качества сепарирования [1]. Поэтому при выборе источников высокого напряжения необходимо учитывать их параметры ( $r, L$ ) и сопоставлять с емкостью  $C_n$  рабочего органа. Следует также отметить, что изменение емкости рабочего органа ДСУ определяет значение потребляемого тока. Таким образом, в диэлектрических сепарирующих устройствах заложена принципиальная возможность автоматического контроля за качеством сепарирования по потребляемому току.

Теперь рассмотрим случай, когда на систему электродов ДСУ подается переменное напряжение высокой частоты. Под действием внешнего электрического поля в семенах смещаются связанные



**Рис. 2. Характер изменения мгновенных значений напряжения  $u$  и мощности  $p$  рабочего органа ДСУ**

заряды. Это смещение требует определенного времени (время  $\tau$  релаксации) и сопровождается трением. Поле, создаваемое разноименно заряженными электродами, затрачивает энергию на преодоление сил трения, что ведет к нагреву семян. Энергия электрического поля, затраченная на нагрев, существенно зависит от соотношения периода  $T$  изменения поля и времени  $\tau$  релаксации. Для переменного поля небольших частот (50 Гц) считается, что электрический момент (поляризация, наведенная внешним электрическим полем) точно следует за изменением внешнего поля. При частотах, значительно больших промышленной, максимум электрического момента отстает во времени от максимума напряженности электрического поля  $E_1$ . Ток, обусловленный движением зарядов внутри семени, представляет собой ток поляризации (ток смещения), плотность которого:

$$\delta_c = 2 \pi f \varepsilon E, \quad (11)$$

где  $f$  – частота подаваемого на электроды напряжения, Гц;  $\varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость семян, Ф/м;  $E$  – действующее значение напряженности электрического поля, В/м.

Активная электрическая мощность в единице объема зерновой массы:

$$p_0 = E \delta_c \cos \varphi = 2 \pi f \varepsilon E^2 \cos \varphi, \quad (12)$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряженностью поля и током смещения.

Вместо угла  $\varphi$  целесообразно ввести угол  $\delta$ , называемый углом поглощения энергии в реальном диэлектрике ( $\varphi = 90^\circ - \delta$ ). Тогда

$$\cos \varphi = \cos(90^\circ - \delta) = \sin \delta. \quad (13)$$

При малых углах  $\sin \delta \approx \operatorname{tg} \delta$ . Это позволяет формулу (12) представить в таком виде:

$$p_0 = 2 \pi f \varepsilon E^2 \operatorname{tg} \delta. \quad (14)$$

На рисунке 3 показана векторная диаграмма для ДСУ, работающего на высокой частоте. Из диаграммы следует, что сила тока  $I_c$  опережает напряжение на угол ( $90^\circ - \delta$ ).

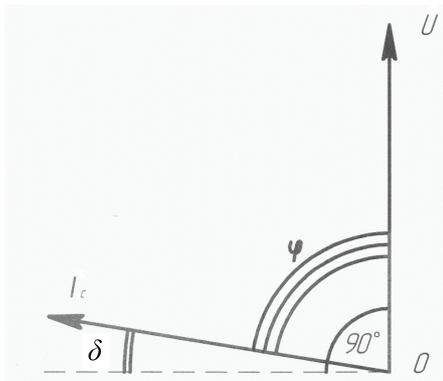


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжения и тока смещения ДСУ

При переменном напряжении высокой частоты поляризация семян сопровождается их нагревом, сушкой. Таким образом, при подаче на систему электродов переменного напряжения высокой частоты ДСУ приобретает новую функциональную возможность подсушивания семян.

Как известно, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  сложным образом зависят от частоты (рис. 4). Такие зависимости обусловлены тем, что при низких частотах диполи семян ориентируются без запаздывания и энергия, поглощаемая диэлектриком, незначительна; тангенс угла потерь мал, диэлектрическая проницаемость не отличается от ее значения при  $f=0$ . При возрастании  $f$  увеличивается скорость поворота диполей, резко возрастают трение и  $\operatorname{tg} \delta$ . При некоторой частоте  $\operatorname{tg} \delta$  достигает максимального значения. Если и далее повышать частоту ( $f > f_0$ ), то диполи уже не успевают поворачиваться вслед за изменением внешнего поля. Поляризация затухает, диэлектрическая проницаемость уменьшается. Так как электрическая сила, действующая на семена, — результат взаимодействия поля и зарядов поляризованных семян, а семена имеют разный биохимический состав, следовательно, и разную скорость и степень поляризации, то, изменяя частоту, можно отбирать семена с заданным качеством. Это принципиально отличает ДСУ от известных элетрозерноочистительных машин [4].

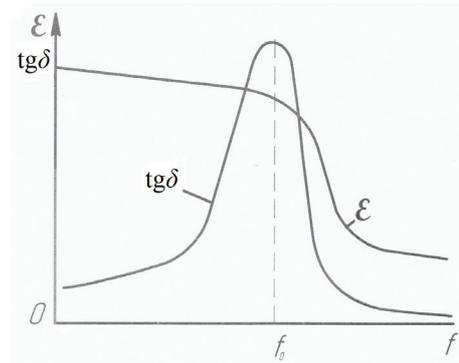


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла поглощения энергии от частоты

Таким образом, в диэлектрической сепарации семян заложена принципиальная возможность отбора (сортирования) семян по их качеству и очистки основной культуры от трудноотделимых и карантинных семян сорных растений, что коренным образом отличает этот метод от механических способов сепарации семенных смесей [5].

### Выводы

1. Цель питания ДСУ включает в себя источник высокого напряжения (трансформатор) с параметрами  $L$  и  $R$ , и рабочий орган с находящимися на нем семенами, представляющий собой устройство ем-

костью  $C$ , к которому электрически присоединена постоянно меняющаяся емкость  $C$ . В такой цепи при колебании емкости могут возникнуть резонансные явления, что в свою очередь может привести к резким колебаниям напряжения при рабочем органе и, как следствие, к ухудшению качества сепарирования. Поэтому при выборе источника напряжения необходимо учитывать его параметры  $L$  и  $R$  и сопоставлять с емкостью  $C$  рабочего органа загруженного семенами.

2. В ДСУ заложена принципиальная возможность автоматического контролировать изменение в рабочем органе. Сам же орган выполняет одновременно и функцию датчика тока. Это способствует созданию и ускоренному внедрению автоматизированных систем для сепарации семян с применением микропроцессорной и другой информационной техники.

3. При питании рабочих органов напряжением высокой частоты ДСУ приобретают новые функции: происходит подсушивание семян и отбор семян с заданными свойствами. Это качественно отличает диэлектрические сепараторы от существующих электрозерноочистительных машин.

4. В ДСУ благодаря тому, что цепь рабочего органа (система разноименно заряженных электродов) носит емкостной характер, а вторичная обмотка питающего трансформатора – активно-индуктивный,

возникает естественная компенсация сдвига фаз и, как следствие, повышение коэффициента мощности  $\cos \varphi$  установки (ДСУ). С возрастанием же емкостной нагрузки, что происходит при загрузке рабочего органа сепарируемым материалом (зерном), возрастает и коэффициент мощности установки.

### Библиографический список

1. Тарушкин В.И. Резонансные процессы в цепи питания диэлектрического сепаратора семян / В.И. Тарушкин, А.П. Козлов // Техника в сельском хозяйстве. 2003. № 2. С. 40–47.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1960. 624 с.
3. Тарушкин В.И. Электрическая емкость библиарной обмотки диэлектрического сепаратора семян / В.И. Тарушкин, А.П. Козлов // Аграрная наука. 2002. № 10. С. 22–25.
4. Басов А.М. Электрозерноочистительные машины: теория, конструкции и расчет / А.М. Басов, Ф.Я. Изаков, В.Н. Шмичель и др. // Машиностроение. 1968. 203 с.
5. Клёнин Н.И. Сельскохозяйственные машины: элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н.И. Клёнин, И.Ф. Попов, В.А. Сакун. М.: Колос, 1990. 456 с.

*Статья поступила 14.06.2016*

## ELECTRICAL PROCESSES IN WORKING BODIES OF DIELECTRIC SEPARATION UNITS

**VLADIMIR I. TARUSHKIN**, DSc (Eng), Professor

E-mail: s777z@mail.ru

Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

The research of electric processes occurring in the dielectric separation device (DSU) allows not only to expand the range of their use, but also make recommendations for their effective operation. It has been found that voltage resonance effects may occur in a power supply circuit. An uncontrolled voltage change on the working body electrodes leads to worsened quality of separation. Therefore, when choosing a source of high voltage power supply of a DSU actuator, it is necessary to compare its parameters with the changing capacitance of the separating unit working body. When AC voltage high frequency is provided, seed polarization is accompanied with seed heating and drying. In this case, the DSU performs a new function of seed drying. It has been noted that the DSU may select seeds basing on their properties if the working body is supplied with high frequency voltage. This makes a DSU more competitive as compared with separation devices operating on the basis of seed mechanical properties only.

**Key words:** electrical processes, working body, dielectric separation unit, seed polarization.

### References

1. Tarushkin V.I. Rezonansnye protsessy v tsepi pitaniya dielektricheskogo separatora semyan [Resonant processes in the supply chain of a dielectric seed separator] / V.I. Tarushkin, A.P. Kozlov // Machinery in Agriculture. 2003. № 2. Pp. 40–47.
2. Tamm I.Ye. Osnovy teorii elektrichestva [Basics of the theory of electricity]. М.: Nauka, 1960. 624 p.
3. Tarushkin V.I. Elektricheskaya emkost' bifilyarnoy obmotki dielektricheskogo separatora semyan [Electrical capacity of a bifilar winding of a dielectric seed separator] / V.I. Tarushkin, A.P. Kozlov // Agricultural Science. 2002. № 10. Pp. 22–25.
4. Basov A.M. Elektrozernoochistitel'nye mashiny: teoriya, konstruktzii i raschet [Electric grain cleaning machines: theory, design and calculation] / A.M. Basov, F.Ya. Izakov, V.N. Shmichel and others. // Mashinostroenie. 1968. 203 p.
5. Klenin N.I. Sel'skokhozyaystvennye mashiny: elementy teorii rabochikh protsessov, raschet regulirovochnykh parametrov i rezhimov raboty [Agricultural machines: Elements of the theory of working processes, the calculation of control parameters and operating modes] / N.I. Klenin, I.F. Popov, V.A. Sakun. М.: Kolos, 1990. 456 p.

Received on June 14, 2016

УДК 621.3.029.6

**АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент<sup>1</sup>

E-mail: asa-finance@yandex.ru

**ЗАГИНАЙЛОВ ВЛАДИМИР ИЛЬИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

E-mail: energo-viz@mail.ru

**ВОРОБЬЕВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ**, докт. техн. наук профессор<sup>1</sup>

E-mail: tatiana49@mail.ru

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

## ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В СВЧ-УСТАНОВКАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Эффективность многих сельскохозяйственных технологических процессов может быть существенно повышена за счет использования энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля. Широкое внедрение СВЧ-техники в производство существенно сдерживается ее низкой надежностью. Одной из основных причин, вызывающей выход из строя СВЧ-генераторов, является аварийный режим, возникающий при включении оборудования с незагруженной рабочей камерой. Автоматическое распознавание аварийных режимов является непростой задачей, поскольку основные электрические параметры СВЧ-генераторов при включении с незагруженной рабочей камерой не меняются. Рассмотрены три новых способа распознавания аварийных режимов и их технические реализации. Первый способ основан на выявлении аварийных режимов по форме кривой тока в цепи питания магнетрона. Для реализации этого способа предложено использовать полосовые фильтры в совокупности с аналоговыми или цифровыми устройствами обработки информации. Второй способ заключается в измерении низкочастотного излучения СВЧ-генераторов, которое существенно увеличивается при возникновении аварийных режимов. При использовании этого способа не требуется вносить изменения в схемы СВЧ-генераторов, что делает его легко реализуемым на любых СВЧ-установках с объемными резонаторами. Третий способ предполагает постоянный автоматический контроль за электрической емкостью рабочей камеры, которая зависит от на-